

**TESIS DE MAESTRIA**

**UN MODELO GENÉTICO-OBJETUAL PARA LA SIMULACIÓN  
DE YACIMIENTOS DE GAS**

*JOSÉ LUBÍN TORRES OROZCO*  
*Ing. de Petróleos*

*Investigación para optar al título de Magíster en Ingeniería de Sistemas*

*Director*  
**JESÚS ANTONIO HERNÁNDEZ RIVEROS.**  
*Ing. Electricista, Esp. Sistemas de Información, DEA Int. Artificial*

*Asesor*  
**GILDARDO OSORIO GALLEGO**  
*Ing. de Petróleos, MSc, PhD Ing. de Yacimientos*

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS  
POSTGRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS**

**Medellín, Febrero de 2001**

**“Durante los próximos cinco años la gente va a decirme que estoy completamente equivocado. Luego, cuando la idea haya conseguido calar, me dirán que ya lo sabían.”**

**Jim Lovelock**

Dedico esta investigación:

*A mis padres, mi familia y mis amigos  
y a todos aquellos que con su gravedad me lanzan  
hacia los profundos abismos de la existencia  
hacia el centro del sentir  
permitiéndome intentar y soñar  
universos mágico-multicolores  
A lo sagrado de lo infinito y lo oculto  
y a lo que se esconde debajo de esta letra que no podéis ver ni leer  
Pero que está impregnada y envenenada  
por tú sensibilidad y mi sensibilidad*

OLM

## **AGRADECIMIENTOS**

*Porque sin sus comentarios, críticas y ayudas teóricas esta investigación no hubiera sido posible:*

**Prof. Geól. Kenneth Cabrera  
Prof. PhD. Mat. Carlos Mejía  
Prof. Fís. Norberto Parra**

*Por acompañarme y asistirme con la edición:*

**Angélica María Calvo Ortega  
Geól. Nury Gallego  
Ricardo Nieto  
Ing. Geól. Jesús A. Hurtado**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>LISTA DE ANEXOS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....</b>	<b>xii</b>
RESUMEN.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	xvii
<b>1. RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE EN SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS.....</b>	<b>1</b>
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>6</b>
2.1 COMPLEJIDAD Y NO LINEALIDAD DE LOS SISTEMAS .....	6
2.1.1 <i>Introducción</i> .....	6
2.1.2 <i>Tipos de complejidad</i> .....	8
2.1.3 <i>Definición y características de la Linealidad y No Linealidad</i> .....	9
2.2 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE FLUJO EN YACIMIENTOS DE PETRÓLEO .....	13
2.2.1 <i>Ecuaciones de Difusividad para flujo monofásico unidimensional en coordenadas cartesianas</i> .....	13
2.2.2 <i>Ecuaciones de Difusividad para flujo monofásico en coordenadas radiales</i> .....	16
2.3 SIMULACIÓN DE SISTEMAS ASISTIDA POR COMPUTADOR .....	20
2.3.1 <i>Beneficios</i> .....	20
2.3.2 <i>Limitaciones</i> .....	20
2.3.3 <i>Posibles usos</i> .....	21
2.3.4 <i>Tipos de simulación</i> .....	22
2.3.5 <i>Aspectos que se deben considerar antes de cualquier Simulación</i> .....	22
2.3.6 <i>Consideraciones que se deben hacer durante y después de la Simulación</i> .....	23
2.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE YACIMIENTOS DE PETRÓLEO .....	23
2.4.1 <i>Visión General</i> .....	23
2.4.2 <i>Tipos de Simuladores</i> .....	24
2.4.3 <i>Simulación Numérica y Discretización</i> .....	24
2.4.3.1 <i>Discretización en el espacio</i> .....	25
2.4.3.1.1 <i>Representación y Nomenclatura de los bloques</i> .....	25
2.4.3.1.2 <i>Distribución Uniforme</i> .....	26
2.4.3.1.3 <i>Distribución Irregular</i> .....	28
2.4.3.2 <i>Discretización en el tiempo</i> .....	30
2.4.3.3 <i>Interpretación del proceso de discretización y los intervalos de espacio y tiempo</i> .....	30
2.4.3.4 <i>Problemas generados por la discretización</i> .....	32
2.4.3.4.1 <i>Representación de pozos</i> .....	32
2.4.3.4.2 <i>Puntos para la evaluación de propiedades</i> .....	33
2.4.3.4.3 <i>Dispersión Numérica</i> .....	33
2.4.3.4.3 <i>Efectos de orientación de la malla</i> .....	33
2.4.3.5 <i>Métodos de Solución para el Modelo Numérico</i> .....	34
2.4.3.6 <i>Error, Consistencia, Covergencia y Estabilidad de un Modelo Numérico</i> .....	36
2.4.4 <i>Diseño del Modelo para el Yacimiento</i> .....	38
2.4.4.1 <i>Selección del número de dimensiones o estructura espacial</i> .....	39

2.4.4.2	Simplificación del modelo.....	42
2.4.4.3	Selección de los datos para las propiedades de la formación y los fluidos.....	44
2.4.5	Ajuste de la Historia de un Yacimiento.....	46
2.5	ALGORITMOS GENÉTICOS.....	46
2.5.1	Visión General y Definición.....	46
2.5.2	Componentes básicos de un algoritmo genético.....	50
2.5.3	Operadores Genéticos.....	51
2.5.3.1	Selección.....	51
2.5.3.2	Cruce (Crossover).....	52
2.5.3.3	Mutación.....	53
2.5.3.4	Otros operadores “inteligentes”.....	53
2.5.4	Diseño del Algoritmo Genético.....	54
2.5.5	Tipos de Algoritmos Genéticos.....	56
2.5.5.1	Algoritmos Genéticos Generacionales.....	56
2.5.5.2	Algoritmos Genéticos de Estado Fijo.....	56
2.5.5.3	Algoritmos Genéticos Paralelos (AGP’s).....	57
2.5.6	Areas de aplicación de los AG's.....	59
2.5.7	Ventajas y desventajas respecto a otras técnicas de búsqueda.....	59
2.6	PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS.....	60
2.6.1	Características de la OOP.....	61
2.6.2	El modelo de objetos.....	62
<b>3.</b>	<b>SIMULACIÓN MONOFÁSICO - TRIDIMENSIONAL DEL CAMPO DE GAS GÜEPAJÉ - AYOMBÉ UTILIZANDO UN MODELO GENÉTICO-OBJETUAL.....</b>	<b>66</b>
3.1	DESCRIPCIÓN DEL YACIMIENTO PROBLEMA.....	66
3.2	PROBLEMA A MODELAR.....	66
3.3	MODELO PARA LA SIMULACIÓN DEL CAMPO GÜEPAJÉ - AYOMBÉ.....	67
3.3.1	Modelo Genético-Objetual (OOGM): Un Modelo Evolutivo Orientado a Objetos.....	68
3.3.2	Discretización Evolutiva del Yacimiento.....	71
3.3.2.1	Consideraciones básicas para la división del yacimiento.....	71
3.3.2.2	Algoritmo Genético-Objetual para la partición espacial del yacimiento.....	72
3.3.3	Modelo Evolutivo para la Solución de Sistemas de Ecuaciones Algebraicas no Lineales.....	81
3.3.3.1	Modelo General.....	82
3.3.3.2	Modelo Genético.....	83
3.3.3.3	Modelo Objetual.....	86
3.3.4	Modelo Evolutivo para la Solución de la Distribución de las Presiones a través del Modelo 3D para el yacimiento.....	91
3.3.4.1	Planteamiento de Ecuaciones numéricas para flujo de un fluido compresible en tres dimensiones.....	91
3.3.4.2	Condiciones de Frontera y Condición Inicial.....	94
3.3.4.2	Modelo para la simulación evolutiva de la distribución de la caída de presión a través del yacimiento.....	97
3.3.4.2	Diagrama de flujo de información para el distribuidor evolutivo de información.....	102
3.4	IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO GENÉTICO-OBJETUAL PARA LA SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN DEL POZO GÜEPAJÉ 1 DEL CAMPO GÜEPAJÉ-AYOMBÉ.....	104
3.4.1	Simulador con distribuidor de presiones evolutivo.....	104
Orden de procesos del programa.....	105	
Orden en los subprogramas de la aplicación general.....	106	
3.4.2	Simulador implícito típico.....	106
3.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	107
3.5.1	Simulador con Distribución de Presión Evolutivo.....	107
3.5.1.1	Error del simulador.....	107
3.5.1.2	Convergencia del simulador.....	107
3.5.1.3	Distribución de Presiones para $t > t_{inicial}$ .....	108
3.5.1.4	Parámetros de la ecuación de distribución para $t > t_{inicial}$ .....	108
3.5.2	Simulador con distribución de presión estándar (Simulador típico).....	109
3.5.2.1	Error y convergencia del simulador.....	109
3.5.2.2	Distribución de Presiones para $t > t_{inicial}$ .....	109
3.5.3	Comparación de resultados entre ambos simuladores y datos reales.....	109

<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>112</b>
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>114</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>132</b>

## LISTA DE ANEXOS

		Pág.
<b>ANEXO 1.</b>	Ubicación Geográfica del campo GÜEPAJÉ - AYOMBE.	132
<b>ANEXO 2.</b>	Mapa estructural del campo GÜEPAJÉ - AYOMBE.	133
<b>ANEXO 3.</b>	Sección estructural esquemática en proyección vertical del yacimiento GÜEPAJÉ - AYOMBE.	134
<b>ANEXO 4.</b>	Forma tridimensional de la zona productora del campo GÜEPAJÉ - AYOMBE.	135
<b>ANEXO 5.</b>	Historia de producción del campo GÜEPAJÉ - AYOMBE.	136
<b>ANEXO 6.</b>	Historia de presiones del campo GÜEPAJÉ - AYOMBE.	138
<b>ANEXO 7.</b>	Resumen de las propiedades del yacimiento GÜEPAJÉ - AYOMBE.	140
<b>ANEXO 8.</b>	Estado mecánico del pozo GÜEPAJÉ 1.	144
<b>ANEXO 9.</b>	Discretización gráfica del yacimiento GÜEPAJÉ - AYOMBE en los planos xy y xz respectivamente, utilizando un intervalo espacial uniforme para cada plano.	145
<b>ANEXO 10.</b>	Discretización gráfica del yacimiento GÜEPAJÉ - AYOMBE en los planos xy y xz respectivamente, utilizando una división evolutiva espacial para cada plano.	146
<b>ANEXO 11.</b>	Interacción de clases en el modelo general para simular el yacimiento GÜEPAJÉ - AYOMBE.	147
<b>ANEXO 12.</b>	Calibración del simulador evolutivo con la condición inicial del yacimiento ( $t=t_{inicial}$ ).	148
<b>ANEXO 13.</b>	Resultados del simulador evolutivo para tiempos posteriores al inicial ( $t>t_{inicial}$ ).	149
<b>ANEXO 14.</b>	Resultados para un simulador estándar a tiempos posteriores al inicial ( $t>t_{inicial}$ ).	153

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1</b> Manejo y Simulación de yacimiento en un ambiente de datos multidisciplinario	8
<b>Figura 2</b> Ciclo de la complejidad en proyectos	9
<b>Figura 3</b> Exactitud Vs Complejidad	10
<b>Figura 4</b> Complejidad Dinámica Vs Complejidad de Detalle	11
<b>Figura 5</b> Malla de punto centrado a) Representación, b) Nomenclatura	26
<b>Figura 6</b> Malla de bloque centrado a) Representación, b) Nomenclatura	26
<b>Figura 7</b> Discretización de un sistema lineal con distribución uniforme y malla de punto centrada	27
<b>Figura 8</b> Discretización de un sistema lineal con distribución irregular de malla centrada	28
<b>Figura 9</b> Distribución de la saturación de agua a través de un yacimiento: a) Curva hipotética normal, b) Modelo de 5 bloques para simular la distribución de agua.	31
<b>Figura 10</b> Curva típica de Presión Vs Distancia en un yacimiento de petróleo	32
<b>Figura 11</b> Trayectorias de flujo paralela y diagonal en una malla rectangular	34
<b>Figura 12</b> Modelos típicos usados en Simulación de Yacimientos: a) Tanque, b) 1D, c) 1D radial, d) seccional, e) y f) 2D o areal, g) 3D y f) Seccional-radial	41
<b>Figura 13</b> Modelos areales: catesiano, radial y curvilíneo respectivamente	42
<b>Figura 14</b> Dos formas de dividir un modelo multisección en dos zonas	42
<b>Figura 15</b> Modelo gráfico típico para un proceso de simulación	43
<b>Figura 16</b> Codificación de una variable a través de dígitos binarios	49
<b>Figura 17</b> Esquema con dos puntos de cruce	53
<b>Figura 18</b> Esquema con múltiples puntos de cruce	53
<b>Figura 19</b> Mutación del cuarto gen en un cromosoma	54
<b>Figura 20</b> Inversión de un bloque de 5 genes en un cromosoma	54



<b>Figura 21</b>	Esquema general de funcionamiento de un AG	56
<b>Figura 22</b>	Modelo de reproducción mediante islas	58
<b>Figura 23</b>	Modelo celular de reproducción de un AG	58
<b>Figura 24</b>	Modelo Evolutivo Orientado a Objetos (OOGM) para un sistema complejo a optimizar	70
<b>Figura 25</b>	Partición de una superficie 3D (yacimiento petrolífero) en base a una función no lineal	73
<b>Figura 26</b>	Algoritmo General para el divisor espacial evolutivo	73
<b>Figura 27</b>	Forma del cromosoma para diseñar la partición no lineal	76
<b>Figura 28</b>	Flujo de información en el modelo genético - objetual para sistemas de ecuaciones no lineales	83
<b>Figura 29</b>	Ejemplo descriptivo del esquema objetual del conjunto de ecuaciones e incógnitas de un sistema NL problema	85
<b>Figura 30</b>	Esquema del individuo_solución para un sistema de m ecuaciones y n incógnitas	85
<b>Figura 31</b>	Plantilla de Clase en OASIS	86
<b>Figura 32</b>	Interacción de clases en el modelo para solucionar ecuaciones no lineales	87
<b>Figura 33</b>	Representación de los estratos productores del yacimiento	94
<b>Figura 34</b>	Significado de la presión media ( $P_o$ ) y la presión de fondo ( $P_{wf}$ ) alrededor del pozo	95
<b>Figura 35</b>	Límite interno y externo en el modelo para el yacimiento	96
<b>Figura 36</b>	Modelo para distribuir la presión en base a la distancia del pozo	98
<b>Figura 37</b>	Distribución de la caída de presión usando un esquema exponencial simple	101
<b>Figura 38</b>	Distribución de la caída de presión usando un esquema exponencial doble	101
<b>Figura 39</b>	Algoritmo General para el distribuidor de presión evolutivo	103

## LISTA DE TABLAS

		Pág.
<b>Tabla 1</b>	Lista final ordenada por ajuste después de división evolutiva	77
<b>Tabla 2</b>	Resultados de la distribución espacial para uno de los individuos de la Tabla 1	79
<b>Tabla 3</b>	Ejemplo del cálculo de la distribución de secciones e intervalos en el plano xy	81
<b>Tabla 4</b>	Distribución de la caída de presión sin valores aleatorios	99
<b>Tabla 5</b>	Distribución de la caída de presión con valores aleatorios	100
<b>Tabla 6</b>	Distribución de la caída de presión con valores aleatorios y bloques con presión igual a $P_{inicial}$ . ( $dp=0$ )	102

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

- A : Area transversal al flujo en un yacimiento lineal (pies)
- $B_o$  : Factor volumétrico del petróleo (BBL Yac / BBL Est.).
- $B_g$  : Factor volumétrico del gas (BBL Yac / BBL Est.).
- $B_{gi}$  : Factor volumétrico del gas en el bloque i (BBL Yac / BBL Est.).
- c : Compresibilidad del fluido. (1 / Lpca).
- dr : Distancia radial de un bloque (pies).
- dt : Valor de un intervalo de tiempo (horas).
- dx : Distancia de un bloque en dirección x (pies).
- dy : Distancia de un bloque en dirección y (pies).
- dp : Caída de presión entre dos bloques (lpca).
- h : Espesor de la formación en un yacimiento (pies).
- K : Permeabilidad (milidarcys)
- $K_i$  : Permeabilidad en bloque i (milidarcys)
- L : Longitud de un yacimiento lineal (pies).
- M : Peso Molecular del gas (lbm/lbmol).
- P : Presión (Lpca).
- $P_D$  : Presión adimensional
- $P_{inicial}$  : Presión inicial del yacimiento (Lpca).
- $P_i$  : Presión en el bloque i (Lpca).
- $P_o$  : Presión en el bloque del pozo (Lpca).
- $P_{wf}$  : Presión fluyente en el fondo del pozo (Lpca).
- $P_{wfi}$  : Presión fluyente en el fondo del pozo en el bloque i (Lpca).

- $P_{sc}$  : Presión pseudocrítica del gas.
- $P_{sr}$  : Presión pseudoreducida del gas.
- $Q_{gi}$  : Tasa volumétrica de producción de gas en el bloque i (Miles de  $\text{pie}^3$  estándar/Día (MPCSD)).
- $R$  : Constante universal de los gases:  $10.732 \text{ lpc} \cdot \text{pie}^3 / \text{lb-mol} \cdot \text{°R}$
- $r$  : Distancia radial.
- $r_D$  : Radio adimensional.
- $r_e$  : Radio externo del yacimiento.
- $r_{eD}$  : Radio externo adimensional.
- $r_o$  : Radio equivalente en el fondo del pozo (pulg).
- $r_w$  : Radio del fondo del pozo (pulg).
- $s$  : Daño de la formación alrededor del pozo ( $L_{pca}$ ).
- $T$  : Temperatura del fluido ( $^{\circ}\text{R}$ )
- $T_{sc}$  : Temperatura pseudocrítica del gas.
- $T_{sr}$  : Presión pseudoreducida del gas.
- $t$  : Tiempo (dias).
- $t_D$  : Tiempo adimensional.
- $U$  : Energía del fluido (btu).
- $x$  : Distancia longitudinal en el eje x (pies).
- $x_i$  : Distancia longitudinal hasta el centro del bloque i en el eje x (pies).
- $y$  : Distancia longitudinal en el eje y (pies).
- $y_i$  : Distancia longitudinal hasta el centro del bloque i en el eje y (pies).
- $w$  : Distancia longitudinal en el eje z (pies).
- $w_i$  : Distancia longitudinal hasta el centro del bloque i en el eje z (pies).
- $z$  : Factor de compresibilidad.
- $\psi$  : Pseudo-presión. ( $\text{lpc} \cdot \text{pie}^2 / \text{cp}$ ).

- $\beta$  : Parámetro de estabilidad.
- $\rho$  : Densidad del fluido (lbm/pie<sup>3</sup>).
- $\rho_g$  : Densidad del gas (lbm/pie<sup>3</sup>).
- $\rho_{gi}$  : Densidad del gas en el bloque i (lbm/pie<sup>3</sup>).
- $\rho_{sc}$  : Densidad pseudocrítica del gas.
- $\rho_{sr}$  : Densidad seudoreducida del gas.
- $\mu$  : Viscosidad (centipoises).
- $\mu_g$  : Viscosidad del gas (centipoises)
- $\mu_{gi}$  : Viscosidad del gas en el bloque i (centipoises)
- $\phi$  : Porosidad (fracción).
- $\phi_i$  : Porosidad en bloque i (fracción).
- $\gamma$  : Gravedad específica del fluido.
- $\Delta r$  : Valor de un intervalo radial (pies).
- $\Delta t$  : Valor de un intervalo de tiempo (horas).
- $\Delta x$  : Valor de un intervalo longitudinal en dirección x (pies).
- $\Delta y$  : Valor de un intervalo longitudinal en dirección y (pies).

### **Subíndices, Superíndices y Símbolos**

- i : Subíndice indicando número del bloque en dirección x.
- j : Subíndice indicando número del bloque en dirección y.
- k : Subíndice indicando número del bloque en dirección z.
- e : Función exponencial.
- n : Subíndice indicando intervalo de tiempo.
- 0 : Subíndice indicando valor inicial.

## RESUMEN

En esta investigación se miden y analizan los alcances reales de la aplicación de herramientas evolutivas de la inteligencia artificial a la solución de problemas complejos de difícil solución como los presentados en el flujo turbulento de gas.

Se propone un modelo evolutivo orientado a objetos novedoso, que intenta modelar la complejidad dinámica y de detalle en sistemas complejos, el cual fue probado mediante la simulación de un yacimiento de gas explotado por ECOPEPETROL; el modelo ha sido llamado Modelo Genético-Objetual (OOGM: Oriented Object -Genetic Model) y ya ha sido mostrado a la comunidad científica mundial en varias conferencias en investigación de punta, tanto nacionales como internacionales [Torres, 2000a, b, c, d].

El modelo OOGM se utiliza inicialmente para un proceso evolutivo de discretización del espacio, busca dividir tridimensionalmente e “inteligentemente” el yacimiento problema en base al comportamiento de las ecuaciones de flujo que lo rigen.

También, se utiliza el modelo evolutivo para la solución de sistemas de ecuaciones algebraicas no lineales, estos sistemas aparecen frecuentemente adheridos o relacionados a sistemas más complejos como las ecuaciones diferenciales parciales; métodos de solución de estos sistemas utilizados frecuentemente como el de Newton que son reconocidos por su rapidez y sencillez, fallan al converger a extremos locales o valores no válidos para el fenómeno físico analizado, así el modelo propuesto ayuda a la búsqueda de valores más confiables en tiempos aceptables. Este problema es particularmente notorio en la simulación aquí realizada, ya que el yacimiento analizado, fue discretizado en cientos de bloques, y en cada uno de estos se debía resolver al menos un sistema de ecuaciones no lineales; para evitar la acumulación de errores en el simulador, debía en muchas ocasiones utilizarse el modelo propuesto.

Finalmente, se integraron los dos anteriores submodelos a un tercero: un distribuidor evolutivo de presiones a través del yacimiento, que equivale a decir: un solucionador de las ecuaciones

numéricas implícitas no lineales resultantes de la discretización de la ecuación diferencial parcial aplicada al yacimiento de gas, objeto del problema ejemplo.

Los tres sub-modelos son alimentados, a partir del modelo general, mediante la utilización de la Programación y el Diseño Orientado a Objetos , que hace ver el modelo general evolutivo mucho más natural, sencillo e íntegro. Todos los objetos y sus relaciones (ecuaciones), reconocibles en el yacimiento se traducen en este modelo.

El simulador evolutivo no sólo no ignora los términos no lineales de las ecuaciones de flujo, como otros modelos que necesitan realizar un proceso de linealización para poder resolver el problema, sino que representa o se acopla de una forma más natural y real a la distribución de la presión a través del yacimiento.

Para la evolución se utilizaron los algoritmos genéticos, y se concluye en la pertinencia de continuar el estudio mediante la utilización de la Programación Genética para una modelación más adecuada de la evolución.

## INTRODUCCIÓN

La Simulación Numérica de Yacimientos de Petróleo utilizando computadores, es una técnica muy difundida y utilizada después de la década del 50, por sus grandes posibilidades para manejar la explotación de un yacimiento. Las predicciones sobre el comportamiento y reservas del yacimiento permiten optimizar las inversiones y desarrollo futuro del campo de petróleo. También permiten adelantarse a posibles problemas o a un correcto manejo de estos. Esta técnica demostró con el paso de los años que podía reemplazar o integrarse a otras técnicas de modelamiento existentes en la Industria del Petróleo, por la facilidad y robustez que daba a los modelos.

Este paradigma de la simulación consiste de programas de computador que solucionan ecuaciones diferenciales parciales para flujo de fluidos en medios porosos, en las cuales se involucran procesos físicos, químicos y geológicos, necesitándose de la convergencia de disciplinas como las matemáticas, el análisis numérico, la ingeniería y la heurística para lograr los resultados finales.

Hoy en día, el fenómeno físico de flujo en medios porosos, se enmarca dentro del estudio de los sistemas dinámicos abiertos, que a su vez hace parte de la novedosa Teoría de la Complejidad, la cual hoy da sus primeros pasos, y abre las posibilidades para hacer de la modelación un verdadero arte en ingeniería, mediante la integración de las nuevas herramientas de todas las áreas del conocimiento, las cuales presentan inmensas similitudes en los problemas manejados, integración que desde ya se constituye en una de las principales aventuras de la ciencia para el nuevo milenio.

Dentro de este contexto, en este proyecto de investigación se busca comprender y predecir el comportamiento de un sistema complejo como lo es un yacimiento de gas, más concretamente la simulación del yacimiento GÜEPAJÉ-AYOMBE, manejado por la empresa estatal petrolera ECOPETROL, combinando las técnicas vigentes de la simulación y la modelación, con técnicas



de la computación evolutiva. La simulación se desarrolla dentro de un esquema de ecuaciones no linealizadas por ningún método. Aunque el problema solucionado se hizo dentro de unos límites a su complejidad (flujo monofásico, ausencia de presiones capilares y heterogeneidades, etc); el método empleado permitirá que estudios posteriores utilicen herramientas más poderosas de la computación evolutiva como lo son la programación genética, estrategias de evolución, etc, extiendan y corroboren las predicciones de este estudio para problemas mucho más complejos. El modelo mismo y sus primeras aplicaciones, ya han sido presentadas a nivel nacional e internacional [Torres, 2000a, b, c, d], y se trabaja en dos proyectos de tesis de pregrado, uno que ya finaliza [Sánchez, 2001], y otro que está en su gestación.

En el capítulo 1 se mencionan algunos de los estudios más importantes en la simulación de yacimientos de petróleo, muchos de cuyos resultados son aplicados en el presente estudio; en el capítulo 2 se revisan los conceptos teóricos en complejidad, simulación de sistemas, simulación de yacimientos, algoritmos genéticos y programación orientada a objetos, que fueron los cinco paradigmas más importantes utilizados para crear el modelo presentado en este trabajo. En el capítulo 3 se muestra el modelo desarrollado y su aplicación a tres sub-problemas presentes en la simulación de yacimientos de gas, cuyas soluciones se integraron para resolver el problema de predicción del comportamiento del yacimiento GÜEPAJÉ-AYOMBE. En el capítulo 3 y 4 se hace un análisis de los resultados y se concluyen las principales observaciones de la investigación. En el capítulo 5 se dan pautas y recomendaciones para continuar y mejorar esta investigación. Finalmente se muestra un glosario de términos especializados de esta área y además se dan unos anexos con tablas y figuras sobre las propiedades del yacimiento, propiedades del modelo y resultados obtenidos.

## 1. RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE EN SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS

*“El arte se subordina a la verdad, el juego a lo serio y el ser al valor”. J. Bucher*

En 1949, Van Everdingen y Hurst [Van Everdingen, 1949] presentaron la primera solución para la ecuación de difusividad en coordenadas radiales para flujo monofásico. En esta solución no está presente el término que involucra los gradientes al cuadrado, ni la variación del término viscosidad por compresibilidad. Ellos consideraron los casos de rata terminal constante y presión terminal constante; y resolvieron la ecuación tanto para comportamiento infinito como para comportamiento finito. Para llegar a estas soluciones utilizaron como principal herramienta las transformadas de Laplace; sus resultados fueron tabulados. También explican algunos principios de superposición. Este estudio ha sido, y es, ampliamente utilizado para el modelamiento de acuíferos y sistemas yacimiento-pozo.

En 1953, Bruce et al [Bruce, 1953], presentaron quizás el primer estudio de yacimientos en el cual solucionan la ecuación de difusividad para flujo transiente de un gas ideal tanto para coordenadas radiales como cartesianas, utilizando un método numérico para solucionar esta ecuación de segundo orden cuasi-lineal. Sin embargo, no consideraron el término que involucra los gradientes de presión al cuadrado. Este estudio fué continuado por trabajos como el de Carter [Carter, 1962] y el de Eilerts entre otros [Eilerts, 1964], los cuales desarrollaban significativos avances en la aplicación de las diferencias finitas a la solución de las ecuaciones fundamentales de flujo para medios porosos.

En 1962, Rowan y Clegg, [Rowan, 1962] realizaron un estudio donde revisan las ecuaciones fundamentales que gobiernan el flujo de fluidos en medios porosos, mostrando cómo la forma de la ecuación cambia dependiendo de los parámetros que son función de presión, espacio o tiempo. Ellos discuten las implicaciones de la linealización de las ecuaciones básicas, los problemas prácticos debido a la utilización de soluciones analíticas muy complejas y el enmascaramiento de los principios físicos debido a las soluciones numéricas. Para resolver en parte estas dificultades, proponen un método de solución para flujo transiente de gas y líquidos compresibles e incompresibles. Es un método analítico aproximado que postula una zona de disturbio en el yacimiento, además reemplaza la derivada de presión respecto al tiempo por su

valor medio en la zona de disturbio. Los autores obtienen resultados para diferentes condiciones: yacimientos estratificados, discontinuidades en la permeabilidad radial, sistemas multi-pozo e interferencia de pozos.

En 1966, Al-Hussainy et al, [Al-Hussainy, 1966a] presentaron un estudio en el cual se maneja las ecuaciones de flujo para gases, transformadas por una nueva variable que ellos definieron como pseudo-presión; esta nueva variable es función de la viscosidad y el factor de compresibilidad del gas, y les permitió considerar la variación de estos dos parámetros. Esta transformación presenta varias ventajas importantes para la solución de las ecuaciones de flujo no lineales y cuasi-lineales. Primero, es considerado el término que incluye los gradientes de presión al cuadrado, el cual comúnmente era despreciado, ocasionando, según los autores, graves errores en la predicción de la presión principalmente en formaciones de baja permeabilidad. Segundo, las ecuaciones de flujo para gases en términos de pseudo-presión, no contienen explícitamente la viscosidad o el factor de compresibilidad del gas, y así se evita la necesidad de seleccionar una presión promedia a la cual evaluar las propiedades físicas del gas. Tercero, la pseudo-presión del gas puede ser determinada por integración numérica en función de la presión pseudo-reducida y la temperatura; y puede presentarse en forma tabulada o gráfica.

En 1972, Raghavan et al, [Raghavan, 1972] presentaron un estudio de continuación del análisis de Al-Hussainy et al, descrito en el párrafo anterior. También se define la variable pseudo-presión; pero a diferencia del estudio anterior, éste no sólo incluye las propiedades del fluido, densidad y viscosidad, sino también las de la formación, porosidad y permeabilidad. Transformando o linealizando las ecuaciones de flujo no lineales, mediante la utilización de estas nuevas variables, los autores dan solución a problemas de flujo transiente y de heterogeneidad de la formación, por métodos más ajustados a la realidad del fenómeno. De la misma manera que el estudio anterior, en esta investigación también se considera rigurosamente el término que incluye los gradientes de presión al cuadrado y se omite la selección de valores promedios de los parámetros manejados.

En 1973, Hurst presentó un método numérico de solución para las ecuaciones de flujo no lineales [Hurst, 1973a]. Este método se caracteriza por su facilidad de manejo, sin perder por ello exactitud. Hurst utilizó la solución de la integral exponencial, el principio de superposición en yacimientos de petróleo, y definió algunas nuevas variables en función de la presión y la compresibilidad, la cual no se consideró constante. Por medio de la manipulación de estas nuevas variables se llega a la obtención de resultados confiables en breve tiempo.

En 1975, Weinbrandt et al, inician una serie de estudios tendientes a investigar la influencia de la temperatura y presión de confinamiento sobre la permeabilidad [Weinbrandt, 1975]. En los primeros dos estudios se llegó a la conclusión de que la permeabilidad absoluta disminuye considerablemente con el incremento de la temperatura, sin embargo, en el tercer estudio, se concluyó que la permeabilidad absoluta no varía con la temperatura. Los autores explican esta anomalía en los resultados, por las limitaciones siempre presentes en el laboratorio: incapacidad de simular correctamente el fenómeno, baja confiabilidad de los instrumentos de medición, etc. De otro lado, se encontró en los últimos dos estudios, que un aumento en la presión de confinamiento del medio poroso puede ocasionar significativas disminuciones en la permeabilidad absoluta.

En [Aziz, 1976] , se mostró un estudio donde comparan ocho soluciones analíticas para flujo de gas, con una solución numérica. Ellos utilizaron como fuente de datos varios yacimientos de gas de Alberta (Canadá) y las ocho soluciones analíticas se basaron en las ecuaciones de difusividad en términos de presión, presión al cuadrado y pseudo-presión. Concluyen que la aproximación en términos de pseudo-presión es la más ajustada a la solución numérica, seguida por la aproximación en términos de presión al cuadrado. También se concluyó que la aproximación en términos de presión sólo debiera ser utilizada cuando se trata de caídas de presión bajas; en el caso de una caída de presión alta, únicamente la aproximación en términos de pseudo-presión arroja resultados confiables. Finalmente, se pudo observar que se obtienen siempre mejores resultados cuando los parámetros (viscosidad, compresibilidad, etc.) son evaluados en condiciones medias, en vez de evaluarlos en condiciones iniciales.

En 1983, Thomas y Thurnau, inventan un novedoso método de solución de las ecuaciones numéricas aplicadas a la solución de problemas de flujo [Thomas,1983]. El método se llamó: Método Implícito Adaptativo, y consiste en reordenar la matriz de ecuaciones numéricas en submatrices, de acuerdo a un parámetro adaptativo que autoajusta las submatrices en el número ideal de ecuaciones explícitas e implícitas, para asegurar rápida convergencia y estabilidad de las soluciones. El tiempo de cómputo se bajó hasta un 10% del tiempo total utilizando los métodos estándares de solución, y, las necesidades de almacenamiento bajaron hasta un 60 % de los estándares.

En 1988, Odeh y Babu, presentaron un estudio donde se da solución analítica a ecuaciones de flujo no lineales, aplicadas al flujo de un fluido levemente compresible [Odeh, 1988]. Se consideró el término que involucra los gradientes de presión al cuadrado, y se obtuvieron soluciones tanto

para coordenadas cartesianas como radiales cuando se da un flujo transiente a rata constante; además, se consideró un sistema lineal cerrado que produce a presión de fondo constante. Los autores básicamente hallan el error cometido al utilizar una solución lineal o linealizada, ellos concluyen que este error no es mayor de un 5%, por lo cual las soluciones lineales o linealizadas son adecuadas para cálculos ingenieriles.

Entre 1978, 1983 y 1990, Peaceman, publicó sendos artículos sobre la interpretación de las presiones en el fondo del pozo en proyectos de simulación numérica, él consideró bloques irregulares, permeabilidad anisotrópica, pozos no centrados y múltiples pozos en un mismo bloque [Peaceman, 1990].

En 1990, Viera et al, aplican el método implícito adaptativo, desarrollado por Thomas y Thurnau a una simulación térmica de un yacimiento [Viera, 1990].

En 1994 y 1998, Ding et al, continúan los estudios de Peaceman acerca de la simulación del fondo del pozo, se hace un análisis más detallado de características consideradas por Peaceman, como bloques de forma irregular, radio equivalente, longitud equivalente, pozos no centrados, etc [Ding yu, 1998].

Por el lado de las nuevas metodologías para solucionar problemas de flujo, las matemáticas y las técnicas numéricas son las ciencias que principalmente han proporcionado nuevas herramientas desde mediados del siglo XX, y junto con los nuevos paradigmas del modelamiento y la simulación asistida por computador, trabajan para desarrollar técnicas novedosas de solución: métodos multigríd, elementos finitos, volúmenes finitos, pseudo-funciones, técnicas fractales, Series de Fourier, diferencias finitas etc. [Eymard, 1992] [Fung, 1992] [Odeh, 1988], permaneciendo todavía poco explotadas las técnicas de la inteligencia artificial.

Sin embargo, algunos trabajos empiezan a mostrar el interés de la Industria del Petróleo por las nuevas herramientas computacionales: redes neuronales, en el campo del estudio de composición del gas natural [Petroleum Engineer, 1995], flujo en pozos de petróleo [Habiballah, 1996], y modelos de distribución de propiedades petrofísicas [Wang, 1999]. También se usa lógica difusa para construir modelos en el campo de la recuperación de petróleo [Xiong, 1997] [Xiong, 1995].

Desde 1983, algunos trabajos utilizaron métodos implícitos adaptativos o evolutivos para la solución de las ecuaciones numéricas formadas al discretizar las ecuaciones diferenciales parciales aplicadas al flujo en medios porosos [Viera, 1990] [Thomas, 1983] sin embargo, estos métodos aprovechan muy poco los conceptos de las técnicas evolutivas de la Inteligencia Artificial como los Algoritmos Genéticos. Este trabajo intenta hacer la aplicación de estas herramientas provenientes de una rama de la inteligencia artificial llamada inteligencia computacional sobre la solución de estas mismas ecuaciones de difusividad.

Recientemente, se han publicado algunas tesis y artículos [Jovel,1999] [Torres, 1999] [Velásquez, 1997] uno de pregrado y dos de postgrado, que muestran las inmensas posibilidades de la computación evolutiva.

Adicionalmente, en la Universidad Nacional de Colombia se ve una preocupación creciente por la aplicación de las nuevas herramientas computacionales para la simulación de sistemas complejos, hecho que se hizo evidente en varios seminarios ya realizados en la Sede, en 1999 y 2000, en las áreas de la Computación Evolutiva y el Modelamiento y Simulación de Sistemas, donde se mostraron y difundieron las nuevas técnicas de la Inteligencia Computacional por medio de la presentación de proyectos como este y otros anteriormente mencionados [Sánchez, 2001] [Torres, 2000a, b, c, d].

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

*"...El lenguaje, lejos de ser un simple medio de expresión, es el sitio mismo en el que el pensamiento se recoge, la morada del ser, donde el ser se dice y donde el pensamiento del hombre acoge y recoge su dicto"*  
Heidegger

En este capítulo se revisan algunos conceptos necesarios para facilitar al lector la comprensión del planteamiento y solución del problema de simulación de sistemas complejos, caso específico: yacimiento de gas, esencia de este proyecto de investigación y tema del próximo capítulo.

### 2.1 COMPLEJIDAD Y NO LINEALIDAD DE LOS SISTEMAS

#### 2.1.1 Introducción

El siguiente extracto proveniente de [Calabrese,1996] puede darnos una idea de la tensión que se presenta en la búsqueda del conocimiento, tanto en la ciencia como en cualquier otra disciplina desde el surgimiento de estructuras cognoscitivas tan influyentes como la griega:

“Debido a las dificultades para conocer o aprehender el comportamiento de la mayoría de los sistemas reales, la ciencia hace uso de un reduccionismo del problema estudiado y aplica un esquema deductivo para producir una rigurosa prueba de la necesidad. Desde tiempos inmemoriales conocer implica reducir, sin diferenciar esto de aquello la tarea de interpretar el mundo sería imposible y el pensamiento humano sometido a tensiones infinitas, se disolvería irremediabilmente en una masa gelatinosa sin forma ni sentido. Pero tantos siglos de aplicar el ejercicio reduccionista nos ha hecho pensar que el mundo “es así” o tal vez “podría ser así”.

Teorías como la del caos, técnicas como la geometría fractal, y grandes errores durante siglos en la aplicación de ciencias como la física newtoniana, nos muestran que el mundo es algo más que objetos interrelacionados ordenados por la razón.

Entendemos así, cual es el azaroso camino que recorre el hombre al tratar de develar los misterios que presentan los denominados sistemas no lineales, en los cuales, la mayoría de las propiedades y sus consecuencias observacionales, no pueden ser derivadas a partir de las premisas por medio de una estructura lógico-deductiva. Muchas de esas propiedades ni siquiera pueden ser expresadas en los términos precisos de la lógica proposicional, sino que sólo son aprehendidas mediante imágenes y patrones geométricos

que nunca llegan a completarse., sino que se amplían abruptamente según se amplía la escala de observación.

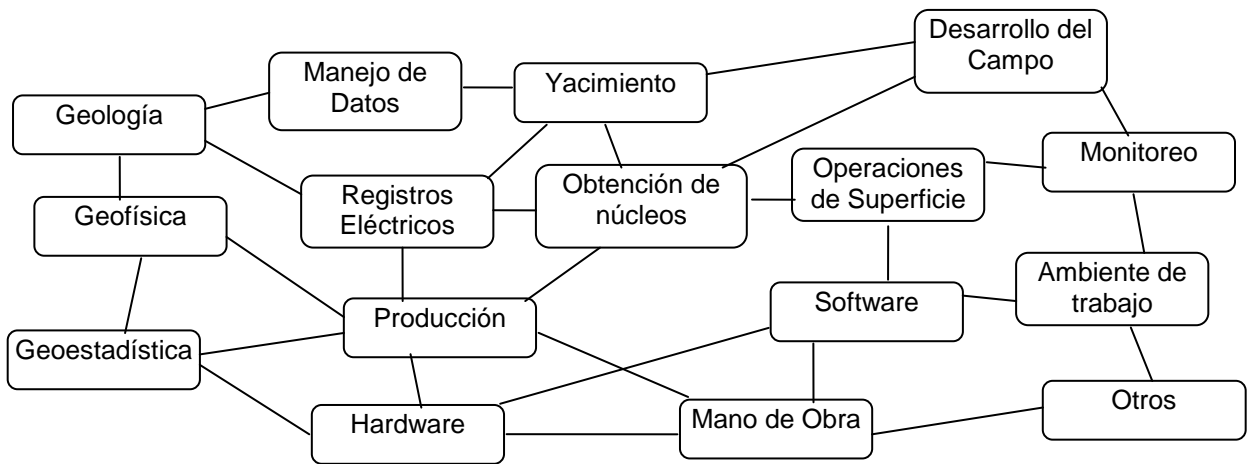
La teoría del caos, de la complejidad o de las redes neuronales, parecen recordarnos que un mundo de objetos conectados por sucesos, es una imagen demasiado simplificada del mundo real y que es necesario explorar a fondo los puentes que entrelazan las teorías de las diversas disciplinas, aceptando el gran riesgo que implica transitar por un espacio más inseguro pero también más rico (como el que sugieren los fractales). En este camino no hay método infalible que guíe nuestra acción sino que estos serán siempre provisionales y parciales, se construirán y modelarán en la medida en que modelamos los pliegues de las teorías".

Desde finales del siglo anterior, se gestó la teoría de la entropía en los sistemas abiertos, como una forma de medir el desorden o grado de "impredicibilidad" para la lógica matemática o medios cognoscitivos vigentes en ese momento. La información se postuló como un antídoto contra la complejidad natural, sin embargo hoy, con mucha más información y con poderosos sistemas computacionales, se repite el eterno retorno del paradigma científico para gestar las verdades del momento que salven los abismos en la investigación científica: Atractores Extraños, Teoría del Caos, Fractales, etc; aquí el esfuerzo es hacia conocer el comportamiento de los sistemas abiertos y dinámicos o sistemas complejos adaptativos. Fué en los dominios de la Teoría del Caos donde se gestó la paradójica ciencia del Caos Determinista, encontrando que detalles considerados mínimos como las condiciones iniciales del sistema, eran determinantes en el comportamiento del sistema, que hay muchas vías para llegar a estados caóticos, que los sistemas caóticos generalmente eran no lineales y requieren al menos tres grados de libertad, etc. [Solé, 1996] [Ruelle, 1993] [Haken, 1990].

Como una solución parcial al entendimiento de esta complejidad, adicionalmente a las teorías del caos, surgen nuevas metodologías científicas, que intentan atacar el problema como un todo, dos ejemplos de éstas son: la Teoría General de los Sistemas [Von Bertalanffy, 1986] o Pensamiento Sistémico [Senge, 1994] y la Procenética [Villermoux, 1993]. A diferencia del enfoque analítico de las ciencias clásicas que descompone, disecciona y se concentra en las estructuras microscópicas, en estos nuevos enfoques se apunta a obtener una visión global de las estructuras y de los comportamientos. Dicho de otro modo, consideran también el bosque y no sólo el árbol.

La Figura 1 muestra todas las disciplinas que deben vincularse para realizar en conjunto un proyecto de simulación de un yacimiento [Salery, 1998]:





**Figura 1.** Manejo y Simulación de un yacimiento en un ambiente de datos multidisciplinario.

Así, debido a ambientes de la ingeniería tan amplios y heterogéneos, siguiendo el camino sistémico, surge la necesidad también de la integración de los sistemas [Peebler, 1998] [Cooper, 1997].

### 2.1.2 Tipos de complejidad

Salery [Salery, 1998], al igual que anteriormente Senge [Senge, 1994], plantea que existen dos tipos de complejidad en proyectos de simulación:

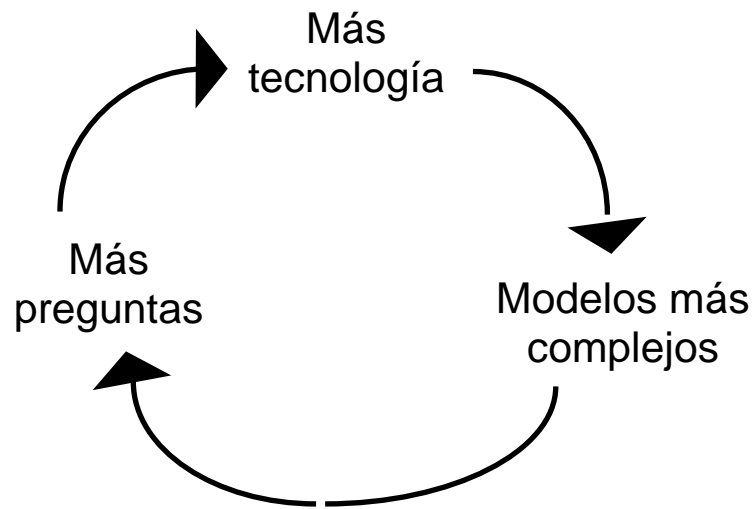
Complejidad de detalle: relacionada con la definición y manejo detallado de los componentes individuales del proyecto.

Complejidad Dinámica: relacionada con las consecuencias dinámicas de las interacciones entre los componentes individuales del sistema. Generalmente estas consecuencias o resultados son impredecibles.

La Simulación de un sistema es nuestro intento de vincular la complejidad de detalle del sistema con la la complejidad dinámica del mismo. Sin embargo, el control real de la mayoría de los proyectos, recae en el entendimiento de la última y no de la primera. [Salery, 1998] [Senge, 1994].

Las Figura 2, 3 y 4 muestran relaciones entre la complejidad y el tipo de modelo a solucionar y la primera respecto al error esperado del modelo [Peebler,1998] [Salery, 1998] [Cooper , 1997]. Obsérvese en la figura 4 como al aumentar la complejidad del análisis realizado no

necesariamente se disminuye el error, incluso algunas veces puede aumentar y otras converger a un mínimo error inherente al modelo.

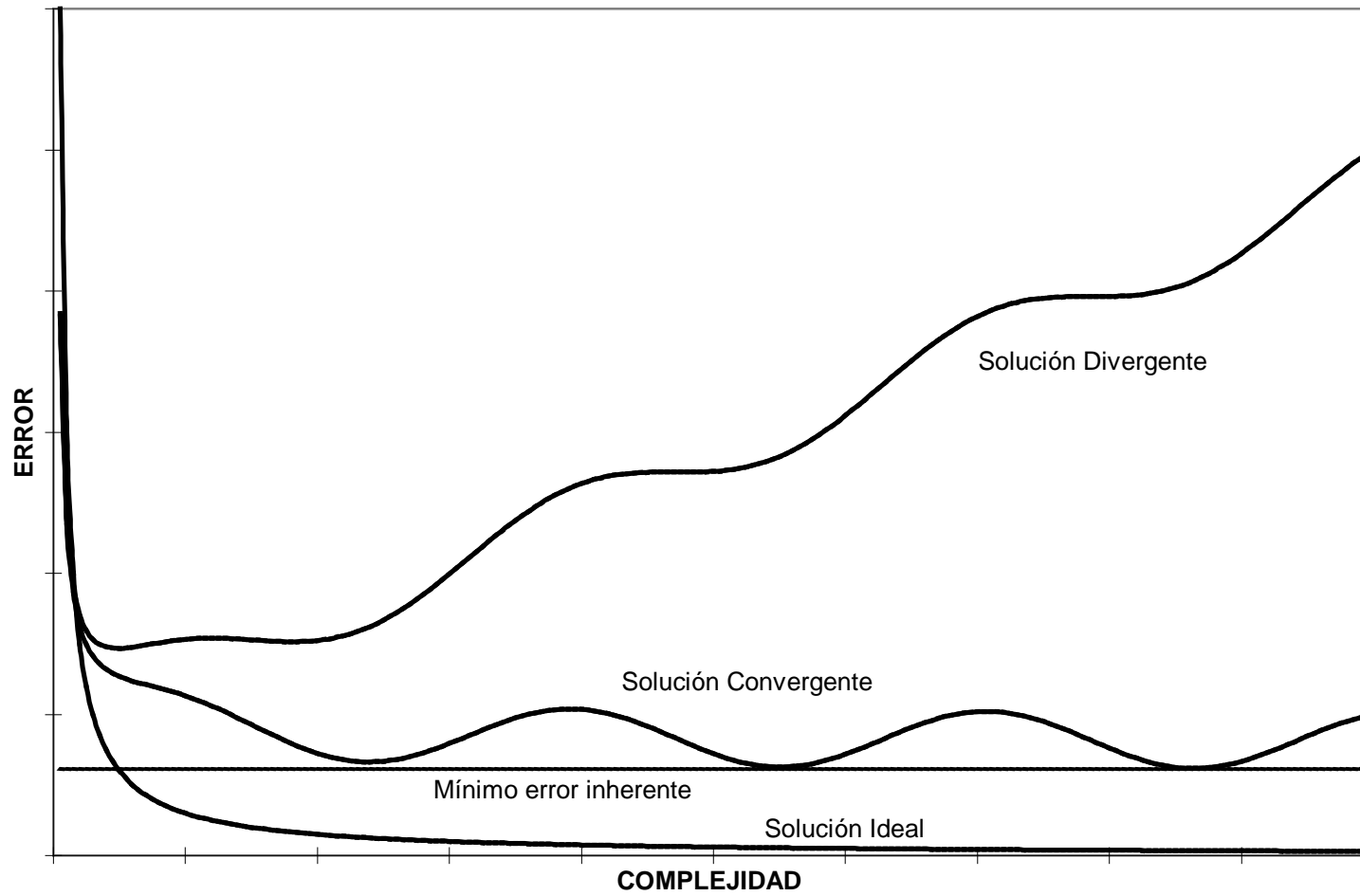


**Figura 2.** Ciclo de la complejidad en proyectos.

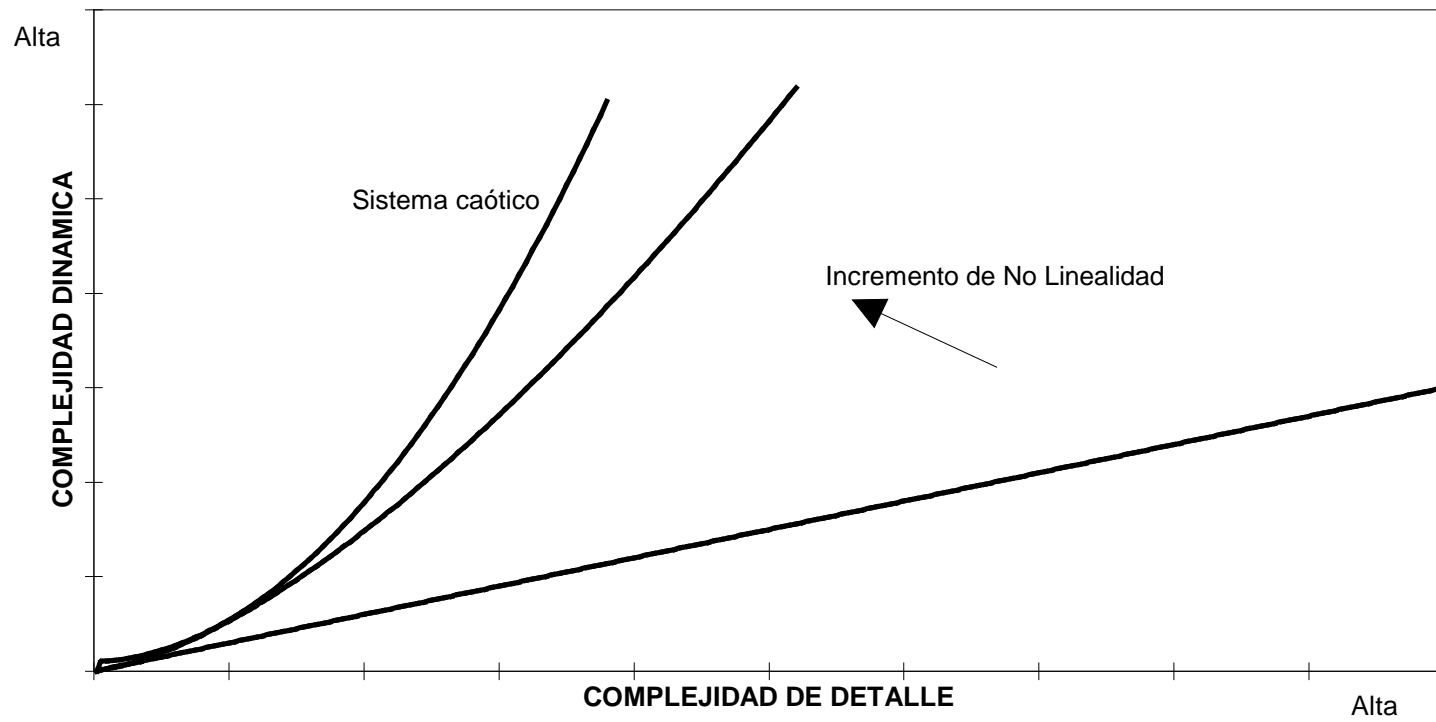
### 2.1.3 Definición y características de la Linealidad y No Linealidad

*Sistema Lineal:* Son sistemas fáciles de describir y controlar debido a sus propiedades. Muestran una respuesta similar a perturbaciones o cambios idénticos, debido a esto, son fáciles de predecir si se conocen algunas de las respuestas a datos de entrada, o sea que los efectos son proporcionales a las causas.

*Sistemas no Lineales:* Los efectos no son proporcionales a las causas. Pueden existir variables que se comporten linealmente, pero con una que sea no lineal, hará que el sistema se comporte de igual manera [Haken, 1990]. De difícil manejo y soluciones inesperadas. No se pueden generalizar. Deben ser analizados caso por caso. La mayoría de los sistemas reales son de este tipo, sobre todo aquellos que involucran procesos físicos: cinética química, transferencia de calor, mecánica de fluidos, etc. [Samofal, 1998] [Ames, 1992]



**Figura 3.** Exactitud Vs Complejidad del análisis del sistema.



**Figura 4.** Complejidad Dinámica Vs Complejidad de Detalle

En la simulación de sistemas usualmente se utilizan ecuaciones algebraicas, integrales, diferenciales ordinarias, o diferenciales parciales las cuales serán lineales o no lineales de acuerdo al tipo de sistema que traten de describir.

Una ecuación diferencial ordinaria de orden  $n$  es lineal si tiene la siguiente forma [Ames, 1992] [Derrick, 1984] [Agnew, 1968] :

$$\frac{d^n y}{dx^n} + f_{n-1}(x) \frac{dy^{n-1}}{dx^{n-1}} + \dots + f_1(x) \frac{dy}{dx} + f_0(x)y = g(x) \quad (1)$$

donde  $f_i(x)$  y  $g(x)$  son funciones de  $x$  solamente, en todos los otros casos se dice que la ecuación diferencial es no lineal.

Para el caso de una ecuación diferencial parcial de orden  $n$ , la definición tiene alguna similitud. Considérese la ecuación diferencial parcial de segundo orden para dos variables [Ames, 1992] [Fritz, 1982] [Lapidus, 1982]:

$$a \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + d \frac{\partial w}{\partial x} + e \frac{\partial w}{\partial y} + fw = g_1 \quad (2)$$

Si se cumple que:

<b>a, b y c =</b>	{	f(x,y)	La ecuación es Lineal
		f(x, y, w, $\partial w/\partial x$ , $\partial w/\partial y$ )	La ecuación es Cuasi-Lineal
		Todos los otros casos	La ecuación es No Lineal

En especial cuando  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes, se hace la clasificación [Ames, 1992] [Lapidus, 1982]:

<b>b<sup>2</sup>-ac =</b>	{	>0	Hiperbólica
		=0	Parabólica
		<0	Elíptica

Ejemplos de estas ecuaciones serían:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad \text{Ecuacion de onda - Hiperbólica}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial w}{\partial y} \quad \text{Ecuacion de calor o difusion - Parabólica}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad \text{Ecuacion de Laplace -}$$

## 2.2 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE FLUJO EN YACIMIENTOS DE PETRÓLEO

Las ecuaciones que resultan del estudio del flujo de uno o varios fluidos a través de un medio poroso pueden llegar a ser muy numerosas dependiendo de las características consideradas en el fenómeno: número de fases, propiedades de cada fase, propiedades del medio poroso y tiempo de interés, entre otras. Algunas veces semejante estudio, debería incluir también influencias externas sobre el medio poroso y sus fluidos, en otras, se deberá correlacionar la superposición de los efectos de varias partes de un mismo medio poroso. [Craft, 1991] [Matthews, 1967].

Estas ecuaciones, también pueden llegar a ser tan complejas, que existe un área específica de las teorías del caos dedicada a la turbulencia que se da en el movimiento de fluidos [Ruelle, 1993].

### 2.2.1 Ecuaciones de Difusividad para flujo monofásico unidimensional en coordenadas cartesianas

Se conoce como ecuación de difusividad a aquella expresión resultante de combinar tres ecuaciones diferentes para un medio poroso donde hay movimiento de fluidos: primero, la ecuación de continuidad [Craft, 1991] [Dake, 1978]:

$$\frac{\partial (\rho U_x)}{\partial x} = - \frac{\partial (\phi \rho)}{\partial t} \quad (3)$$

Donde :  $\rho$  : Densidad del fluido .  
 $U$  : Energía del fluido.  
 $t$  : Tiempo .  
 $\phi$  : Porosidad  
 $x$  : Distancia.

ecuación que representa una forma diferencial de expresar la ley de la conservación de la masa; segundo, una relación entre la velocidad del fluido y la presión del medio, dada generalmente por la ley de Darcy:

$$U_x = - \frac{K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4)$$

donde:  $K_x$  : Permeabilidad en dirección x.  
 $P$  : Presión.  
 $U$  : Energía.  
 $\mu$  : Viscosidad del fluido.

y finalmente, una relación entre la densidad del fluido y la presión del medio, dada por la ecuación de estado para dicho fluido. En el caso de un fluido incompresible  $\rho = \text{cte}$ , y la ecuación de difusividad es:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0 \quad (5)$$

En el caso de un fluido levemente compresible la ecuación de estado es:

$$\rho = \rho_o e^{c(P-P_o)} \quad (6)$$

Donde:  $\rho_o$  : Densidad inicial del fluido .  
 $P_o$  : Presión inicial del fluido.  
 $c$  : Compresibilidad del fluido .

La ecuación de difusividad, llega a ser [Lee, 1982] [Dake, 1978] [Matthews, 1967]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + c \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 = \frac{\phi \mu c}{k} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (7)$$

Finalmente para un fluido compresible la ecuación de estado es:

$$\rho = \frac{M}{RT} * \frac{P}{z} \quad (8)$$

Donde: M : Peso Molecular del gas  
P : Presión  
R : Constante universal de los gases  
T : Temperatura  
z : Factor de compresibilidad del gas

La ecuación de difusividad, llega a ser:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\mu z} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\phi}{k} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P}{z} \right) \quad (9)$$

Estas expresiones consideran que [Craft, 1991] [Odeh 1988] [Dake, 1978]:

- La permeabilidad es constante y el medio poroso es isotrópico.
- La compresibilidad de la formación es despreciable y por ello la porosidad permanece aproximadamente constante.
- No existen efectos gravitacionales sobre el fluido.
- El área transversal al flujo es aproximadamente constante.

Además, en los casos de fluidos levemente compresibles se asume la viscosidad y compresibilidad aproximadamente constantes. Para mantener válido este hecho, se puede elegir un intervalo de tiempo y una presión determinada (presión media o inicial por ejemplo), en los cuales se cumplen dichas suposiciones. Cuando estas varíen significativamente, un nuevo



intervalo de tiempo y una nueva presión se deberán tener bajo consideración [Aziz, 1976] [Al-Hussainy, 1966].

Las ecuaciones (7) y (9), son no lineales ya que (7) presenta un gradiente de presión al cuadrado, y (9) presenta uno de los diferenciales multiplicado por un término en función de la variable dependiente [Derrick, 1984] [Fritz, 1982] [Lapidus, 1982] [Agnew, 1968]. (Observar definición en el apartado 2.1.3); por ello, obtener una solución analítica para estas ecuaciones es bastante complejo, debido a esto la mayoría de las veces se simplifican a ecuaciones lineales, por ejemplo la ecuación (9) generalmente se lleva a [Lee, 1982] [Dake, 1978] [Matthews, 1967]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{\phi\mu c}{k} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (10)$$

En esta ecuación, el producto de la compresibilidad por los gradientes de presión al cuadrado se desprecia.

Otras veces, se recurre a solucionar las ecuaciones (7) y (9) por métodos aproximados (numéricos, linealizados, etc) [Mattax, 1990] [Aziz, 1983] [Aziz, 1976] [Carter, 1962] [Rowan, 1962] [Bruce, 1953].

## 2.2.2 Ecuaciones de Difusividad para flujo monofásico en coordenadas radiales

Las ecuaciones de difusividad en este caso presentan alguna similitud con aquellas del caso cartesiano. Para un fluido levemente compresible la ecuación de difusividad es [Craft, 1991] Lee, 1982] [Dake, 1978] [Matthews, 1967]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + c \left( \frac{\partial P}{\partial r} \right)^2 = \frac{\phi\mu c}{k} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (11)$$

La anterior ecuación presenta las mismas suposiciones de la ecuación (9), excepto que en este caso no se toma el área transversal al flujo como constante, sino el espesor de la formación, y  $r$  representa una distancia radial respecto al punto de análisis.

La ecuación (11), semejante a la ecuación (7), es no lineal ya que también presenta un gradiente de presión al cuadrado [Derrick, 1984] [Fritz, 1982] [Lapidus, 1982]; [Agnew, 1968] , y su forma lineal más común es [Lee, 1982] [Dake, 1978] [Matthews, 1967].

Al igual que para la ecuación (7), la solución analítica de la ecuación (11) ha sido hasta el momento difícil de obtener en forma exacta, sólo siendo posible obtener soluciones aproximadas o linealizándola por medio de la ecuación (12), que desprecia el término que involucra el producto de la compresibilidad por los gradientes de presión al cuadrado. Esta ecuación es la más frecuente en la literatura, y a su solución para diferentes condiciones se han dedicado muchos esfuerzos. [Dake,1978] [Al Hussainy,1966][Van Everdingen, 1949].

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\phi \mu c}{k} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (12)$$

Para un fluido compresible, la ecuación de difusividad en coordenadas radiales es [Lee, 1982] [Dake, 1978] [Matthews, 1967] [Al Hussainy, 1966]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{P}{\mu Z} \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \frac{\phi}{k} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P}{Z} \right) \quad (13)$$

Esta ecuación lleva inherente las mismas suposiciones que la ecuación (9), y es semejante a esta ecuación en cuanto a su no linealidad se refiere.

Es importante anotar que todas las ecuaciones anteriores, y principalmente aquellas para fluidos compresibles, también consideran:

- Que la temperatura del yacimiento es aproximadamente constante [Lee, 1982]; [Dake, 1978] [Matthews, 1967]. Otros trabajos más rigurosos o más concientes de tener en consideración el máximo de variables posibles, han tomado como sistema de análisis un yacimiento isotérmico, donde las propiedades de éste y sus fluidos sólo varían con la presión [Aziz, 1976] [Al-Hussainy, 1966]. Otros trabajos han estudiado el efecto de la Temperatura [Gobran, 1987] [Samaniego, 1979]; [Weinbrandt, 1975] [Raghavan, 1972]. Sobre lo anterior, se debe pensar que si se incluye la variación de las propiedades del medio poroso y sus fluidos con la temperatura, en las ecuaciones de flujo, no sólo "aumentará la no linealidad" de dichas ecuaciones, sino que también debería disponerse de expresiones que relacionen estas variables con la temperatura, expresiones similares a la Ley de Darcy o ecuación de estado.
- Que el efecto del Flujo No Darciano no es apreciable. Este efecto descrito por Forchheimer [Forchheimer, 1901] trata de representar el flujo de un fluido a altas velocidades, agregando a la ecuación de Darcy términos no lineales. Discusiones posteriores, aunque reconocen la correcta modificación de Forchheimer, no se ponen de acuerdo en la forma de valorar el efecto a altas velocidades de flujo [Civan, 1998] [Firoozabadi, 1995].
- El Efecto Klinkenberg no es apreciable. Este efecto descrito por Klinkenberg [Klinkenberg, 1941], describe la variación de la permeabilidad medida del gas, por el deslizamiento de este sobre las paredes del medio poroso. Opuesto al caso del Flujo No Darciano, es muy importante pero a bajas velocidades.

Finalmente, podemos tratar la ecuación (12) utilizando la definición de Seudo-presión [Al-Hussainy, 1966]:

$$\Psi = 2 \int_{P_o}^P \frac{P}{\mu Z} dP \quad (14)$$

Donde  $\psi$  es la seudo-presión del gas.

Y así llegar a la ecuación [Lee, 1982] [Dake, 1978] [Matthews, 1967] [Al Hussainy, 1966]:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} = \frac{\phi \mu c}{k} \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (15)$$

Obsérvese que las ecuaciones (10) y (12) tienen la forma:

$$\frac{\partial^2 \alpha}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \alpha}{\partial r} = \frac{\phi \mu c}{k} \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (16)$$

Donde  $\alpha$  representa ya sea la presión (P), presión al cuadrado ( $P^2$ ) o la Seudo-presión ( $\psi$ ) [Aziz, 1976] [Al-Hussainy, 1966]. En todos los casos esta es una ecuación diferencial parcial cuasi-lineal [Derrick, 1984] [Fritz, 1982] [Lapidus, 1982] [Agnew, 1968].

Además de lo señalado sobre las anteriores ecuaciones, es importante considerar que la no linealidad de las ecuaciones diferenciales parciales aplicadas al flujo en medios porosos, es una de las más grandes dificultades con las que se enfrenta la Ingeniería de Petróleos y particularmente la Ingeniería del Gas [Odeh, 1988]. Por otra parte, como se dijo antes, las ecuaciones no consideran efectos gravitatorios; esto es semejante a asumir un flujo horizontal en el yacimiento. Aunque esta suposición parece no ser válida, Samaniego [Samaniego, 1979] [Samaniego, 1977] mostró que la componente vertical del flujo es despreciable.

## **2.3 SIMULACIÓN DE SISTEMAS ASISTIDA POR COMPUTADOR**

La simulación es una técnica que permite crear y manejar modelos que respalden la toma de decisiones en el estudio del comportamiento de sistemas complejos reales. Su objetivo principal es reducir el riesgo e incertidumbre asociada a un sistema. Es usada para "jugar" sin riesgo económico o social, "juegos" tipo "que pasa sí" y para probar nuevas ideas sin necesidad de una implementación real [McHaney, 1991].

La simulación asistida por computador (Computer Simulation), hace lo mismo, pero utiliza aplicaciones o programación por computador. Esta técnica, en los últimos años, basándose principalmente en las matemáticas aplicadas (modelamiento matemático), ha ganado mucho terreno debido a factores como: el reconocimiento de las ventajas económicas de esta técnica, el vertiginoso desarrollo de los computadores, el gran número de aplicaciones disponibles para modelar sistemas por computador, incremento de las publicaciones y estudios en el área, construcción de modelos más complejos para el estudio de sistemas del mundo real, y la aceptación de esta técnica como una herramienta vital para el posicionamiento comercial de muchas empresas y universidades en todo el mundo.

El proceso de describir muchos sistemas complejos del mundo real usando sólo técnicas analíticas o matemáticas puede ser difícil o hasta imposible. La simulación por computador surge como una herramienta poderosa (sino la más), para ayudar a estos procesos. El programa de simulación es evaluado numéricamente en un intervalo de tiempo, y mediante comparación con otros modelos o con datos históricos reales, o mediante análisis estadísticos se califica la bondad del modelo, y sus resultados son interpretados para comprender mejor el mundo real [McHaney, 1991].

### **2.3.1 Beneficios**

La principal ventaja de usar la simulación es la reducción del riesgo involucrado en la implementación o modificación de un sistema. Pueden construirse muchos escenarios virtuales para hacer predicciones acerca de todas las posibilidades de modificar un sistema en un aspecto deseado, o la creación de uno nuevo. Mejor seguimiento y control, resultados más rápidos y confiables una vez desarrollado el simulador, son otras ventajas de esta técnica.

### **2.3.2 Limitaciones**

- a) *Costosa y demorada*: En algunos casos, la recolección de los datos y condiciones de entrada, la tecnología involucrada, los cuantiosos análisis, el desarrollo del modelo, y el personal altamente capacitado e interdisciplinario, hacen que la técnica resulte costosa y lenta. Muchas veces será muy difícil estimar el tiempo que tomará el simulador, debido a que la simulación analiza procesos desconocidos que pueden llegar a ser muy dispendiosos. Se puede acelerar mediante simplificación del detalle y utilizando programas (librerías de código) genéricos aplicables a la simulación para no “reinventar la rueda”, pero se debe tener cuidado en descuidar información o detalles claves.
- b) *Resultados aproximados*: Un simulador es hecho por seres humanos que utilizan muchas veces suposiciones que permiten modelar el mundo real, algunas veces, demasiado complejo. Grandes errores pueden encontrarse en los resultados, y es obligación del usuario el no creer en simuladores como si fueran “evangelios” [McHaney, 1991].
- c) *Ajuste del Simulador*: Puede llegar a ser una de las tareas más dispendiosas y frustrantes. Es el proceso de constatar que un modelo sí representa o predice aproximadamente el sistema simulado. Si el error del modelo, es apreciable, los resultados llegan a ser poco confiables y habrá que hacer modificaciones o incorporación de nueva información.

### 2.3.3 Posibles usos

Generalmente se recurre a la simulación por computador cuando:

- a) El sistema real no existe y será muy costoso, demorado, riesgoso o imposible construir un prototipo físico: puentes, carreteras, inversión en mercados, etc.
- b) Existe el sistema real pero es muy costoso, riesgoso, altamente perturbador o imposible su estudio o experimentación directa: viajes espaciales, depósitos minerales, transporte de sustancias tóxicas, etc.
- c) Se necesita una predicción de largo tiempo en el futuro (forecasting models): crecimiento de poblaciones, expansión de incendios, predicción meteorológica, etc.
- d) Se necesitan utilizar ecuaciones matemáticas que no tienen solución analítica (por ejemplo, las ecuaciones diferenciales parciales no lineales, tratadas en los capítulos 2.1 y 2.2): ecuaciones representando flujos, vibraciones, etc.

### 2.3.4 Tipos de simulación

*Monte Carlo:* Utiliza un modelo aleatorio que es usado para solucionar problemas estocásticos o determinísticos donde el paso del tiempo no es determinante, contrario a lo que sucede en la Simulación Discreta. Presenta un generador aleatorio que permite simular eventos. Ejemplos de sistemas para usar este tipo de simulación son: juegos, combates, proyectos de inversión, etc.

*Simulación Discreta:* Se caracteriza por el hecho de simular procesos dependientes del tiempo en los cuales, un evento que cambia el estado del sistema, puede o no suceder una o varias veces. Un ejemplo es el evento de que lleguen uno o varios clientes de un banco a un cajero.

*Simulación Continua:* Relacionada con un modelo que consta de grupos de ecuaciones que representan un sistema en el tiempo. El modelo puede consistir de ecuaciones algebraicas, diferenciales o/e integrales las cuales cambian o dependen en forma continua del tiempo.

### 2.3.5 Aspectos que se deben considerar antes de cualquier Simulación

- a) Evaluar la cantidad de información y conceptos necesarios para completar el modelo mínimo para la simulación, esta evaluación dependerá de una correcta formulación de objetivos. Se debe estar atentos a “cuellos de botella”, antes y durante el proceso, para predecir o evitar problemas insalvables que pueden estropear o dificultar la simulación.
- b) El grupo de trabajo y el grupo asesor deben tener experiencia y ser multidisciplinarios y pluralistas.
- c) Indagar previamente en fuentes de confianza sobre posibles modelos matemáticos simples u otros que puedan solucionar el problema, esto para estar seguros de que el análisis del sistema si amerita un proyecto costoso y dispendioso.

### **2.3.6 Consideraciones que se deben hacer durante y después de la Simulación**

- a) Entrar una cantidad de datos adecuada y bien aproximada.
- b) Ejecutar el programa las veces que sea necesario para obtener una cantidad robusta de resultados, y así tener más datos para evaluar el simulador y el sistema.
- c) Estar atento a los malos resultados, evaluar el error cometido y no temer reconocer que el simulador tiene todavía problemas que se pueden resolver en una etapa de ajuste.
- d) Seguir cada evento de la simulación en su más mínimo detalle.

## **2.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE YACIMIENTOS DE PETRÓLEO**

### **2.4.1 Visión General**

Los simuladores numéricos aplicados a yacimientos de petróleo han sido usados extensamente desde los años 40, ya que pueden resolver problemas que no pueden solucionarse utilizando otras herramientas.[Aziz, 1976] [Rowan, 1962] [Bruce, 1953]

En Simulación de Yacimientos de Petróleo es usual encontrar problemas complejos que involucran una gran cantidad de variables y propiedades: flujo de varias fases (flujo multifásico), dirección de flujo en varias direcciones, características del medio poroso (yacimiento) heterogéneas, características del mercado, estrategias de inversión, regulaciones gubernamentales, etc. [Salery, 1998] [Mattax, 1990].

Anteriormente, cuando el yacimiento era suficientemente grande y complejo, se justificaba realizar una simulación que ayudara con el manejo, toma de decisiones, o planificación a mediano o largo plazo de la explotación del yacimiento; permitiendo reducir costos y optimizar el recobro final.

Las grandes posibilidades y credibilidad que brindan los simuladores modernos, que van de la mano con el gran desarrollo del hardware y el software, han hecho que la Simulación de Yacimientos se popularice en la mayoría de las empresas y universidades relacionadas con la ingeniería aplicada a la industria del petróleo, extendiéndose la simulación, a yacimientos



pequeños, problemas puntuales o procesos especiales de los mismos (conificación, daño del pozo, método de recobro, etc.)

#### **2.4.2 Tipos de Simuladores**

*Black-Oil:* Fueron los primeros simuladores desarrollados y aún los más frecuentes, pueden modelar el flujo de agua, petróleo y gas, pudiendo considerar la solubilidad del gas en el petróleo, pero no pueden modelar cambios en la composición de alguno de éstos últimos. Si los datos de entrada al simulador son lo bastante completos y confiables, los análisis logrados llegan a ser tan realistas, que muchas veces estos simuladores se utilizan para probar nuevos métodos analíticos desarrollados: análisis de pruebas de pozos, solución de ecuaciones de flujo, etc.

*Para propósitos especiales:* Después de los modelos de simulación Black-Oil, se desarrollaron otros para problemas mucho más complejos matemáticamente, simuladores que estudian procesos composicionales, térmicos o químicos, generalmente comunes en proyectos de recuperación avanzada o mejorada del petróleo (EOR). En yacimientos de petróleo volátil o liviano, y gas condensado, la composición de las fases presentes varía fuertemente con la presión. En procesos de recuperación con inyección de vapor, el principal fenómeno a modelar es el térmico. Finalmente, en procesos de inyección de polímeros, inundación con surfactantes o soluciones alcalinas, el principal fenómeno a modelar es el químico.

*Modelos Cilíndricos o Seccionales:* usados para simular segmentos del yacimiento. Útiles para entender el comportamiento de conificaciones, fracturas, fallas, o heterogeneidades del yacimiento en general.

#### **2.4.3 Simulación Numérica y Discretización**

La Simulación Numérica es una técnica que intenta resolver ecuaciones complejas aplicadas al estudio de muchos problemas de ingeniería, modelando el espacio y el tiempo por medio de bloques con propiedades discretas, y aproximando las ecuaciones que representan a cada bloque por medio de métodos numéricos.

En una aproximación en diferencias finitas, la ecuación diferencial a solucionar es reemplazada por un grupo de ecuaciones algebraicas que relacionan las mismas variables que la ecuación original, pero puntualmente. Esas ecuaciones son llamadas ecuaciones en diferencias finitas y el

problema diferencial es de esta manera reducido a un problema algebraico. Mientras más se aproxime el problema discreto a el problema original, mayor similitud habrá entre la solución verdadera y los valores puntuales. El proceso de obtención de las ecuaciones numéricas que aproximen una ecuación diferencial es llamado discretización. [Aziz, 1978 ] [Peaceman, 1977].

Para hacer esta transformación discreta, existen diferentes métodos: integral, variacional, elementos finitos, diferencias finitas, etc. Para el presente trabajo se utilizará el método de las diferencias finitas realizando una expansión por medio de las series de Taylor, discretizando algunas de las ecuaciones base para esta investigación vistas en el apartado 2 de este capítulo.

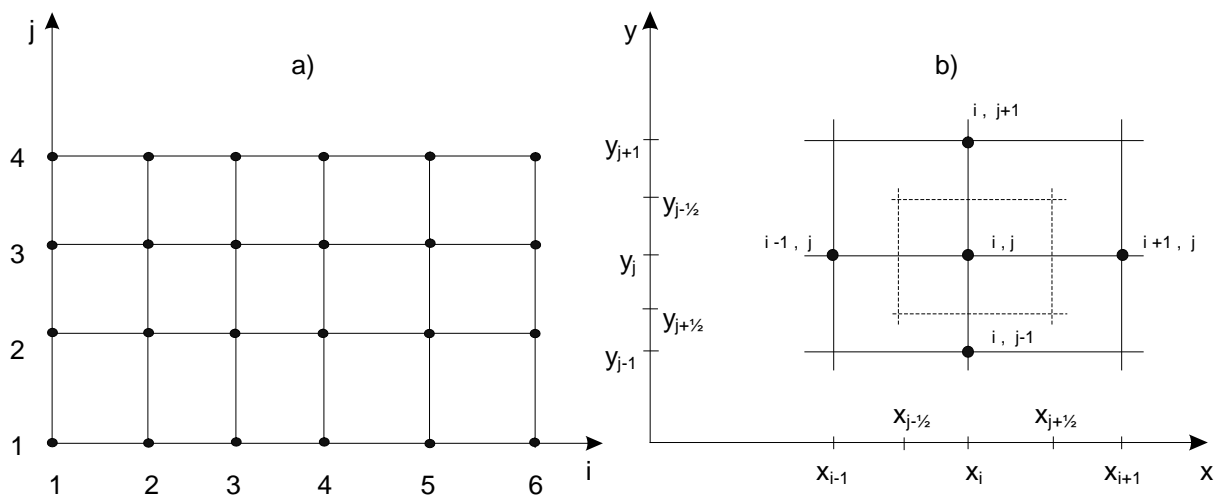
Los simuladores modernos para algunos problemas demasiado complejos de modelar, pueden demandar la utilización de hasta varios millones de bloques, problemas cuyos sistemas matriciales generados, sólo pueden resolverse con los computadores del más alto desempeño.

#### **2.4.3.1 Discretización en el espacio**

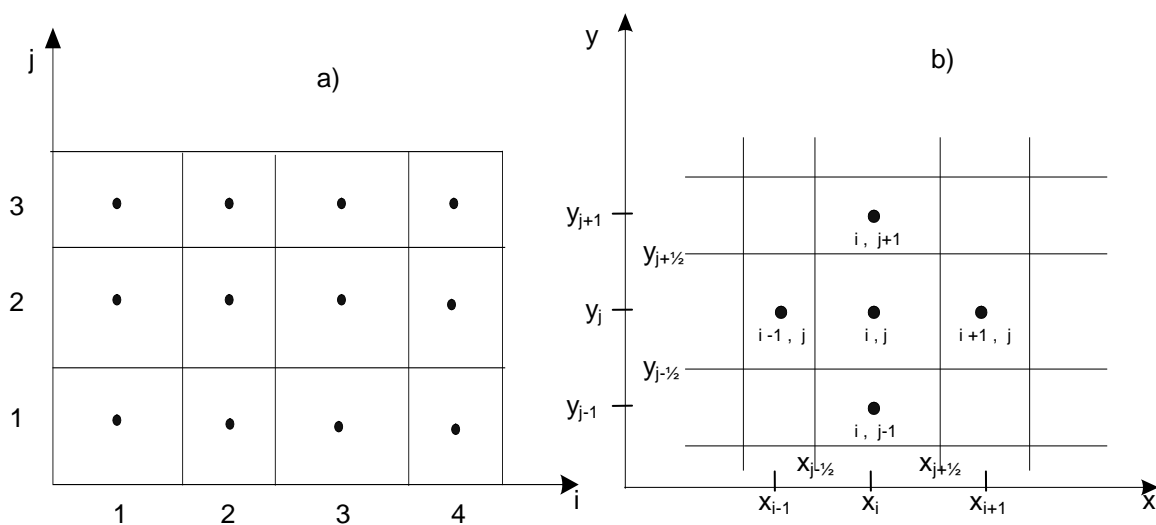
Para ilustrar la anterior discusión observemos los siguientes métodos de discretización en el espacio. En primer lugar se mostrarán dos formas normalizadas de modelar los bloques en una malla, luego se discretizarán diferenciales de primer y segundo grado, utilizando diferencias finitas de espacio constantes (Distribución Uniforme), y variables (Distribución Irregular).

##### **2.4.3.1.1 Representación y Nomenclatura de los bloques.**

En la Figura 5 se aprecia que el punto que representa al bloque se halla en la intersección, este sistema se suele llamar malla de punto centrado (Point-centered grid). Otro sistema, Figura 6, representa los bloques con puntos ubicados en el centro de estos, a este sistema se le denomina malla de bloque centrado (block-centered grid). Las figuras 5 y 6, muestran ambos tipos de representación para un sistema areal (dos dimensiones), con la nomenclatura normalizada para ellos [Mattax, 1990].



**Figura 5.** Malla de punto centrado. a) Representación, b) Nomenclatura.



**Figura 6.** Malla de bloque centrado. a) Representación, b) Nomenclatura.

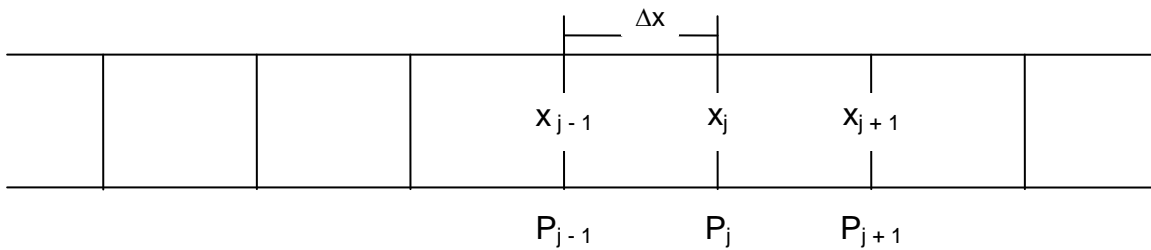
#### 2.4.3.1.2. Distribución Uniforme.

Una función  $f(x)$  puede ser expandida en series de Taylor de la siguiente forma [Leithol, 1992]:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\partial^n f(a_1)}{\partial x^n} \frac{(x - a_1)^n}{n!} = f(a_1) + \frac{\partial f(a_1)}{\partial x} (x - a_1) + \frac{\partial^2 f(a_1)}{\partial x^2} \frac{(x - a_1)^2}{2!} + \dots \quad (17)$$

La ecuación (17) representa la expansión de  $f(x)$  en series de Taylor alrededor del punto  $a_1$ . De acuerdo a la Figura 7, reemplazando la función  $f(x)$  por  $P(x)$  (Presión en  $x$ ), evaluando la función en  $x = x_{j+1}$ , haciendo  $a_1 = x_j$  y  $\Delta x = x_j - a_1 = x_{j+1} - x_j = \text{constante}$  (por ser distribución uniforme), podemos aproximar la primera derivada en  $x_j$ , utilizando la ecuación 17, por [Ames, 1992] [Aziz, 1978] [Peaceman, 1977]:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right)_j = \frac{P_{j+1} - P_j}{\Delta x} \quad (18)$$



**Figura 7.** Discretización de un sistema lineal con distribución uniforme y malla de punto centrada.

La anterior ecuación es denominada **aproximación en diferencias finitas progresiva**.

Si evaluamos en  $x=x_{j-1}$ , obtenemos la **aproximación en diferencias finitas regresiva**:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right)_j = \frac{P_j - P_{j-1}}{\Delta x} \quad (19)$$

Para las aproximaciones (18) y (19) el error de truncamiento es de primer orden ya que el mínimo exponente del incremento de  $x$  de la parte truncada es uno [Ames, 1992] [Aziz, 1978] [Peaceman, 1977]. Se puede intuir de esta figura que a menor  $\Delta x$ , menor error de truncamiento.

Otra aproximación a la que se puede llegar, es a la denominada **aproximación en diferencias finitas centrada** :

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right)_j = \frac{P_{j+1} - P_{j-1}}{\Delta x} \quad (20)$$

Su error de truncamiento es de segundo orden.

También, siguiendo el mismo proceso para obtener la ecuación (18), podemos llegar a la siguiente aproximación para la derivada de segundo orden :

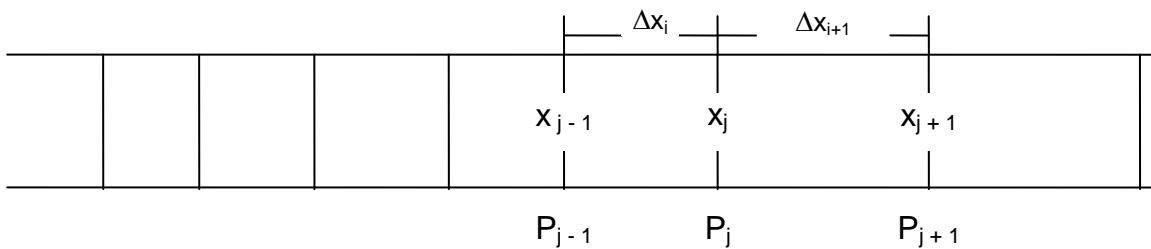
$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{P_{j+1} - 2P_j + P_{j-1}}{(\Delta x)^2} \quad (21)$$

El error de truncamiento también es de segundo orden.

Las anteriores aproximaciones en diferencias finitas son la base de los modelos numéricos construidos en diferentes áreas de la ciencia. Sin embargo, generalmente, se trata de refinar los modelos utilizando una distribución irregular de bloques a través de la variable  $x$ . Este último caso será el de mayor importancia para este proyecto.

#### 2.4.3.1.3. Distribución Irregular.

La figura 8 presenta un sistema con distribución irregular. En este caso, los valores de  $x_j$  son ajustados "convenientemente" a la solución del problema; por ejemplo, en zonas de alta variación de presión o temperatura ; en este caso, a mayor variación de una propiedad, menor longitud del intervalo.



**Figura 8.** Discretización de un sistema lineal con distribución irregular de malla centrada.

Aplicando la ecuación (17) a este sistema con  $x=x_{j+1}$  y  $a_1=x_j$ , se obtiene:

$$P_{j+1} = P_j + \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_j (\Delta x_{j+1}) + \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \Big|_j \frac{(\Delta x_{j+1})^2}{2!} + \frac{\partial^3 P}{\partial x^3} \Big|_j \frac{(\Delta x_{j+1})^3}{3!} + \dots \quad (22)$$

Y si hacemos  $x=x_{j-1}$  y  $a_1=x_j$ , entonces:

$$P_{j-1} = P_j - \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_j (\Delta x_j) + \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \Big|_j \frac{(\Delta x_j)^2}{2!} - \frac{\partial^3 P}{\partial x^3} \Big|_j \frac{(\Delta x_j)^3}{3!} + \dots \quad (23)$$

En este caso, la aproximación progresiva en diferencias finitas para la derivada de primer orden, es obtenida a partir de la ecuación (22):

$$\frac{\partial P}{\partial x} \Big|_j = \frac{P_{j+1} - P_j}{\Delta x_{j+1}} \quad (24)$$

La aproximación regresiva en diferencias finitas es obtenida a partir de la ecuación (23):

$$\frac{\partial P}{\partial x} \Big|_j = \frac{P_j - P_{j-1}}{\Delta x_j} \quad (25)$$

En ambas aproximaciones el error es de primer orden.

Sumando las ecuaciones (22) y (23):

$$P_{j+1} - 2P_j + P_{j-1} = \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_j (\Delta x_{j+1} - \Delta x_j) + \quad (26)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \Big|_j [(\Delta x_{j+1})^2 + (\Delta x_j)^2] + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 P}{\partial x^3} \Big|_j [(\Delta x_{j+1})^3 - (\Delta x_j)^3] + \dots$$

Si utilizamos la ecuación (24) para la derivada de primer orden, podemos llegar a la siguiente aproximación para la derivada de segundo orden:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{P_{j+1} - 2P_j + P_{j-1} - \frac{P_{j+1} - P_j}{\Delta x_{j+1}} (\Delta x_{j+1} - \Delta x_j)}{\frac{1}{2} [(\Delta x_{j+1})^2 + (\Delta x_j)^2]} \quad (27)$$

Las ecuaciones (24) y (27) son de especial importancia para la investigación realizada en capítulos posteriores, ya que en ellas se basa la discretización de las ecuaciones diferenciales parciales no lineales que se solucionarán.

#### 2.4.3.2 Discretización en el tiempo

Para discretizar las ecuaciones diferenciales que rigen muchos fenómenos físicos, como el comportamiento de los fluidos en un medio poroso, no solo se debe pensar cuidadosamente en la discretización del espacio, sino también en la del tiempo. Similarmente, así como se obtuvo la ecuación (18), la derivada de primer orden con respecto al tiempo también se puede aproximar por:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial t} \right)_j^n = \frac{P_j^{n+1} - P_j^n}{\Delta t} \quad (28)$$

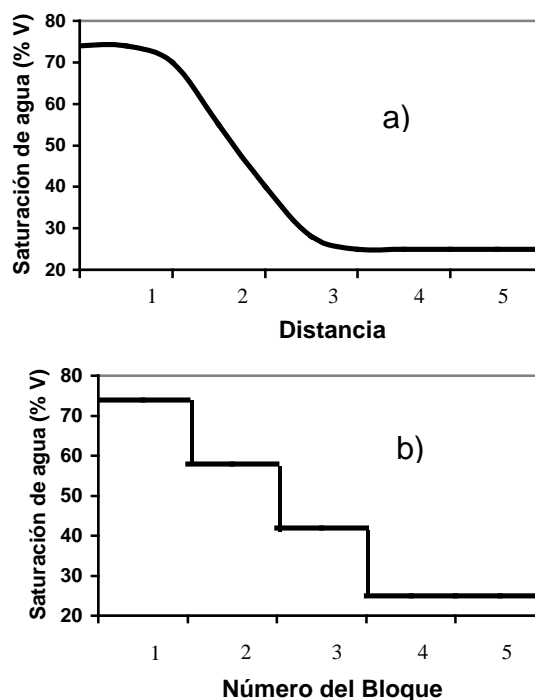
Donde  $j$ , representa el intervalo de espacio, y  $n$  el de tiempo. Esta ecuación se utilizará en las simulaciones realizadas en los capítulos siguientes.

Por lo general el intervalo de tiempo se deja constante a través de toda la simulación de un proceso, a diferencia de los intervalos de espacio. Más adelante serán discutidos algunos hechos relevantes a considerar, cuando se van a elegir los intervalos de espacio y tiempo, proceso que es considerado como vital para que el simulador converja a resultados confiables rápidamente.

#### 2.4.3.3 Interpretación del proceso de discretización y los intervalos de espacio y tiempo.

La solución numérica de ecuaciones no solubles por técnicas analíticas, como se vió en el apartado anterior, aproxima las diferenciales a diferencias finitas, convirtiendo la ecuación en una ecuación de diferencias finitas. Para llegar a estas ecuaciones se necesitó de un proceso de discretización, que es la subdivisión de la distancia y el tiempo en porciones o incrementos

determinados. También podemos pensar este proceso, en el caso de un yacimiento de petróleo, por dar un ejemplo relacionado con el objeto de esta investigación, como la división del yacimiento en elementos de volumen discretos (gridblocks) dentro de los cuales se van a calcular el cambio de las propiedades (permeabilidad, presión, viscosidad, etc), para cada uno, en muchos intervalos de tiempo también discretos (timesteps). Las longitudes de los intervalos de tiempo y espacio, y la complejidad del modelo, determinarán la precisión de los resultados, lógicamente a mayor número de divisiones, mayor precisión se logrará en los resultados con un modelo que represente correctamente el sistema pero será más dispendiosa y costosa la simulación; las divisiones, son escogidas de acuerdo a las necesidades de precisión de resultados, disponibilidad de tiempo y equipos de cómputo, el costo para la construcción del modelo y el costo para obtención de los datos necesarios para el modelo. Los cálculos de las propiedades, se harán al principio y final de cada intervalo de tiempo (no al intermedio), y cada bloque tendrá un valor único para cada propiedad (no variará con la distancia en un bloque). Podemos observar esta característica en la figura 9 [Mattax, 1990]:



**Figura 9.** Distribución de la saturación de agua a través de un yacimiento: a) Curva hipotética normal, b) Modelo de 5 bloques para simular la distribución de agua.



Como se puede observar, en la figura 9, entre los bloques no se presenta una continuidad en la variación de la saturación, sino una fuerte variación, igual sucede en los intervalos de tiempo, esto conlleva a que se presenten ciertos problemas los cuales deben ser tratados en forma especial.

#### **2.4.3.4 Problemas generados por la discretización.**

Al discretizar las ecuaciones, pueden surgir dificultades espaciales en la representación de las propiedades y los fenómenos físicos ocurrientes en el sistema modelado, así, se debe estar atento a cualquier influencia de estas en la calidad de los resultados finales del modelo.

##### **2.4.3.4.1 Representación de pozos.**

Debido a que la variación de la mayoría de las propiedades con la distancia en el yacimiento, no son funciones lineales, dándose el caso que en la región cercana al pozo la variación de propiedades, como la presión, representa el mayor porcentaje de la variación total, como se muestra en la Figura 10, el modelamiento de esta zona por medio de un bloque de gran longitud semejante a los utilizados para zonas más alejadas del pozo, conllevaría a grandes errores en los resultados obtenidos, porque un solo valor sería asignado a toda el área del pozo. Para resolver este problema de modelamiento, se acude a tomar bloques muy delgados en la parte cercana al pozo, y se correlacionan los valores hallados en estos bloques con funciones para las propiedades en el fondo del pozo, y así se hallan los valores necesarios.



**Figura 10.** Curva típica de Presión Vs Distancia en un yacimiento de petróleo.

#### **2.4.3.4.2 Puntos para la evaluación de propiedades.**

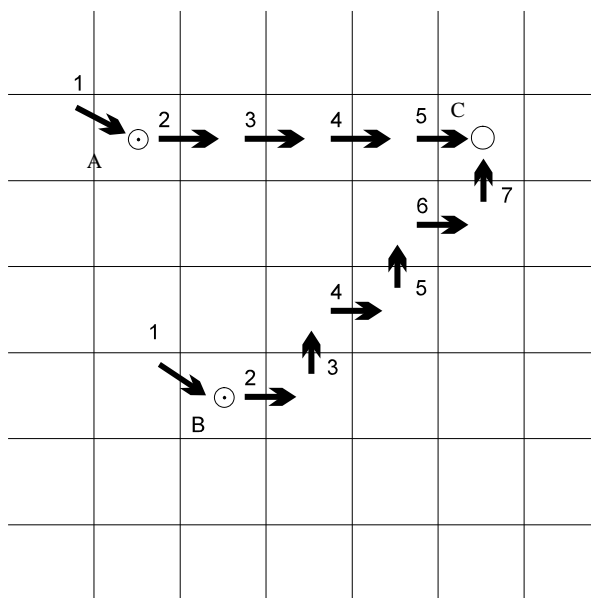
Ciertas propiedades como la movilidad, que es una relación entre la velocidad de movimiento del agua y el petróleo, presentan la dificultad de que para ser evaluadas en un modelo numérico, existen varios bloques respecto a los cuales se puede evaluar esta propiedad. La discusión gira en torno a si se utilizan las propiedades del bloque siguiente, el anterior, un promedio de ambos, o una función de extrapolación o interpolación que dependa de los anteriores.

#### **2.4.3.4.3 Dispersión Numérica.**

Este fenómeno problemático, que causa grandes errores en los modelos de simulación, se observa principalmente en yacimientos donde se modelan cambios rápidos de saturación. Por ejemplo, un proceso de recuperación de petróleo mediante inyección de agua a un yacimiento se relaciona con el hecho de que en cada intervalo de tiempo la saturación avanza sólo un bloque sin importar la longitud de este o del intervalo de tiempo. Este error se puede disminuir hasta niveles aceptables de muchas formas, siendo una de ellas, utilizar un alto número de bloques o de intervalos de longitud lo que traería a su vez un mayor costo y tiempo para la simulación. La dispersión, sin embargo, no se puede eliminar del todo.

#### **2.4.3.4.3 Efectos de orientación de la malla.**

La malla (grid), que es la estructura trazada en un plano representando el conjunto de bloques, conlleva a algunos problemas de orientación cuando se modelan procesos de desplazamiento de petróleo con otros fluidos más móviles. Como se puede observar en la figura 11, la ruta que sigue el fluido desplazante desde dos pozos inyectores A y B, ubicados a igual distancia, hasta el pozo productor C se representa en forma diferente. Como se ha de esperar, el fluido que recorre la ruta B, recorre más distancia, y por lo cual encuentra o desplaza más petróleo. Si rotamos la malla 45°, los cálculos para el desarrollo de los pozos inyectores se invierte: Sería el pozo A el que desplazaría más petróleo. El problema es demasiado complejo, tanto saturaciones como presiones se ven afectadas por la orientación, aumentar el número de bloques ayudaría pero no eliminaría la perturbación. La importancia del efecto es proporcional a la diferencia de movilidad entre el fluido desplazante y el petróleo. Por ejemplo, en desplazamientos con gas o vapor, es muy notorio, pero, en casos con desplazamiento con agua, la mayoría de las veces, no es importante.



**Figura 11.** Trayectorias de flujo paralela y diagonal en una malla rectangular.

#### 2.4.3.5 Métodos de Solución para el Modelo Numérico

Después de discretizar las ecuaciones diferenciales parciales de flujo, lo cual se logra simplemente reemplazando las diferenciales del numeral 2.2 por las aproximaciones halladas en el numeral 2.4.3 , se formará un sistema matricial de ecuaciones algebraicas, que hallará la presión o/y saturación en cada bloque en base a los valores puntuales de las otras propiedades. El método utilizado para solucionar las ecuaciones ya discretizadas determinará la facilidad de uso, velocidad de convergencia, exactitud y el costo de la simulación. [Mattax, 1990] [Aziz, 1978]. En general, los métodos existentes para dar solución a las ecuaciones numéricas se dividen en dos tipos, dependiendo si las ecuaciones son planteadas explícitamente o implícitamente como lo muestra la ecuación 30 (explícita) y 31 (implícita), que son dos formas de plantear el modelo numérico para la solucionar la ecuación 29 [Peaceman, 1977]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (29)$$

$$\frac{P_{j+1}^n - 2P_j^n + P_{j-1}^n}{(\Delta x)^2} = \frac{P_j^{n+1} - P_j^n}{\Delta t} \quad (30)$$

$$\frac{P_{j+1}^{n+1} - 2P_j^{n+1} + P_{j-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} = \frac{P_j^{n+1} - P_j^n}{\Delta t} \quad (31)$$

La ecuación 30, resulta de reemplazar directamente la ecuación 21 y 28 en la ecuación 29; y la ecuación 31, resulta de combinar la ecuación 21 evaluada en el tiempo n+1 y la ecuación 28.

Como podemos observar, la ecuación explícita 30, puede ser resuelta directamente para la presión en el tiempo n+1, pero a un costo demasiado alto ya que el error de redondeo aumenta con el tiempo, y, sino se condicionan los intervalos de espacio y tiempo a ciertos rangos, se puede llegar a resultados poco confiables. Este tema se abordará mejor en el próximo numeral. Por el contrario, la ecuación implícita 31, deberá ser resuelta por un método iterativo, que reemplazará en el sistema de ecuaciones  $P^{n+1}$  por valores aproximados en cada bloque, repetidamente, hasta que la respuesta converja a una solución confiable o dentro de un rango de error tolerable. Este método presenta mejor exactitud que el método explícito, por lo cual se prefiere para simulaciones complejas, pero requiere mayor tiempo de operación computacional y mayor capacidad de procesamiento y almacenamiento en los computadores usados.

Ejemplos de métodos directos son: El método de Thomas, la Eliminación Gaussiana, Factorización LU y LDU, etc.

Ejemplos de métodos iterativos son: Método Gauss-Seidel, Point Relaxation, Line and Block Relaxation, SIP, SOR, LSOR, Jacobi, etc. [Mattax, 1990] [Aziz, 1978]; [Peaceman, 1977].

Mientras los métodos directos pueden solucionar la matriz de ecuaciones en una sola iteración, los iterativos necesitarán repetirse continuamente hasta que el criterio de convergencia se cumpla, así, la rapidez con la cual un método interactivo converge, es el factor primordial para comparar un método con otro. El orden de convergencia de un método determinado, tema examinado en el próximo numeral, es de vital importancia para escoger el método de solución iterativo.

Algunos de ambos tipos de métodos se ajustan mejor, o fueron diseñados, para dar solución a ciertos arreglos específicos de las matrices resultantes de la discretización, principalmente matrices tridiagonales y pentadiagonales. Otros métodos, combinan las ecuaciones explícitas e implícitas obteniendo ecuaciones semi-implícitas que también son resueltas por métodos iterativos [Mattax; 1990] [Aziz, 1978].

#### 2.4.3.6 Error, Consistencia, Covergencia y Estabilidad de un Modelo Numérico

La capacidad de un modelo numérico de converger a soluciones aproximadas dentro de un intervalo de tolerancia, está determinada por el valor del error que se comete en cada iteración; si este es grande y/o aumenta con el tiempo, lógicamente el modelo arrojará pobres o ningún resultado, en este caso se dice que el modelo es **inestable**; si bajo ciertas circunstancias se logra mantener el error bajo, se dice que el modelo es **condicionalmente estable**; en los otros casos el modelo numérico es **estable**. Así como la convergencia esta íntimamente relacionada con el error, el error está relacionado a su vez con [Ames, 1992] [Aziz , 1978] :

- El error de redondeo del software utilizado para solucionar el modelo.
- El error de discretización del modelo, el cual está relacionado con el error inicial, y es debido a las condiciones iniciales del modelo.

En el primer caso, el error es debido, a que, en un lenguaje de programación se asigna cierto número de bytes a un determinado tipo de estructura de dato, la limitante finita en el número de bytes obliga a truncar el número a partir de cierta posición decimal, por ejemplo, el tipo de dato usado para la precisión decimal simple (single), utiliza 4 bytes, y sólo puede representar 6 decimales. Este tipo de error puede llevar a grandes distorsiones en los resultados, son comunes los ejemplos, en los cuales por errores de una centésimas o milésimas en los procesos cíclicos de cálculo, se llega a una solución totalmente diferente a la real [Atkinson, 1978].

Para explicar el segundo tipo de error, observemos el proceso de discretización de la ecuación 18 y 19, como se dijo antes, el error de truncamiento es de primer orden ya que el mínimo exponente del incremento de  $x$  de la parte truncada es uno. Para las ecuaciones 20 y 21, el error de truncamiento es de segundo orden, por lo cual estas aproximaciones llegan a ser más confiables. Los errores se suman al discretizar en espacio y tiempo, así la ecuación numérica 30, se dice que resuelve la ecuación diferencial 29 con un error total ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = O(\Delta x^2) + O(\Delta t) \quad (32)$$

La consistencia de una ecuación o modelo numérico, se da cuando se cumple que [Ames, 1992]:

$$\varepsilon \longrightarrow 0 \text{ cuando } \Delta t \longrightarrow 0 \text{ y } \Delta x \longrightarrow 0$$

En simulaciones numéricas, es fácil presentarse el caso en el cual el método de solución de una ecuación numérica estable converge a la solución de una ecuación numérica diferente [Ames, 1992], un método que es consistente asegura que esto no pase. Uno de los principales fundamentos del análisis del error y la convergencia en los modelos numéricos es el Teorema de la Equivalencia de Lax, el cual dice: "Para una aproximación consistente, la estabilidad es una condición necesaria y suficiente para la convergencia" [Ames, 1992] [Aziz, 1978].

De las definiciones de estabilidad y consistencia, podemos observar que la convergencia de un modelo numérico se da cuando el error disminuye al disminuir el intervalo de espacio. [Aziz, 1978].

Para analizar la estabilidad de un modelo numérico hay varios métodos, entre los más importantes se encuentra el método de Fourier (Von Newman o Harmónico), el cual expande el error en cada bloque utilizando series de Fourier . Aplicando este análisis a la ecuación explícita 30, llegamos a una aproximación de condición para la estabilidad del modelo explícito [Ames, 1992] [Peaceman, 1977]:

$$\frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (33)$$

En el caso de la ecuación implícita 31, aplicando este método, se llega a que el modelo numérico es incondicionalmente estable, resultado que tiene valiosas repercusiones para la preferencia de este método sobre el explícito, como se mostrará en la aplicación e investigación realizada en el capítulo 3.

Sin embargo, el método de Fourier sólo se puede aplicar a sistemas de ecuaciones numéricas lineales, como serían las formadas a partir de las ecuaciones 30 y 31. Para sistemas no lineales ; no existen métodos seguros para evaluar la estabilidad, sólo se proponen algunas condiciones que "podrían" permitir la estabilidad [Ames, 1992].

#### 2.4.4 Diseño del Modelo para el Yacimiento

Inicialmente, siempre es mejor hacer un estudio simple primero, que embarcarse en uno demasiado complejo y de alto costo. El estudio simple nos puede dar una visión general y consideraciones acerca de estudios posteriores.

El modelo será influenciado por:

- Tipo y complejidad del problema
- Precisión y cantidad de resultados necesarios para predicción del comportamiento del yacimiento.
- Tiempo disponible para el estudio.
- Factores económicos.
- Disponibilidad, cantidad y calidad de datos. Muchas veces se necesita hacer un análisis previo sobre la probabilidad de error causada por ausencia o desconfianza en los datos presentes.
- Posibilidades del simulador y de los computadores disponibles.

El diseño debe seguir la siguiente secuencia:

- a) Definición del problema y objetivo del simulador.
- b) Estudio de la disponibilidad de datos.
- c) Seleccionar la estructura espacial del modelo que mejor represente la dinámica del fluido en el yacimiento.
- d) Simplificar el modelo tanto como sea posible, obviar si el modelo lo permite permeabilidades relativas, presiones capilares, etc. Evaluar la exactitud de los resultados esperados respecto a la complejidad que se pueda incorporar.
- e) Seleccionar el valor para el número de intervalos de espacio.
- f) Seleccionar el modelo para evaluar las propiedades PVT (Presión, Volumen y Temperatura).
- g) Seleccionar el número de fases.
- h) Establecer condiciones iniciales.
- i) Establecer un modelo para manejo de los pozos.
- j) Definir el tipo de simulador.

k) Diseñar modelos tipo “borrador” para verificar las suposiciones y servir de base al modelo principal.

#### **2.4.4.1 Selección del número de dimensiones o estructura espacial**

Existen numerosas formas de representar físicamente el yacimiento. La geometría externa (campo superficial, límites de acuíferos, fallas, etc) e interna (heterogeneidades, anisotropía, forma del pozo, etc) deben ser cuidadosamente consideradas. Los tipos de modelos espaciales se listan enseguida en orden de costo, complejidad y demanda de tiempo, y se muestran en la figura 12:

Modelo tipo tanque - 0D (cero dimensiones).

Modelo unidimensional - 1D .

Modelo areal - 2D ( $x,y : r,\theta$ ; curvilíneo).

Modelos seccionales - 2D. Transversal ( $x,z$ ) o radial ( $r,z$ ).

Modelo multisección (secciones de un modelo areal) - 3D.

Modelo tridimensional - 3D.

*El modelo tipo tanque:* Se utiliza para obtener respuestas rápidas, y cuando se considera que el comportamiento de la presión promedio del yacimiento, es el factor más importante para futuras inversiones u operaciones.

*El modelo 1D:* Es poco usado sobre todo en procesos que contengan desplazamiento de un fluido con otro, debido a que no puede representar efectos gravitacionales perpendiculares a la dirección de flujo. Sin embargo puede servir como una valiosa herramienta para evaluar la respuesta del yacimiento a variación en sus parámetros, predecir o intuir el comportamiento de modelos más complejos, influencia de heterogeneidades en el flujo, etc.

*Modelo areal - 2D:* Es el más usado en Simulación de Yacimientos. Se utiliza para estudiar todos los posibles factores involucrados en la explotación de un yacimiento, desde aspectos técnicos hasta económicos. El modelo cartesiano ( $x,y$ ), es más común, sin embargo, el radial ( $r,\theta$ ) y curvilíneo es más apropiado para la simulación del pozo, haciéndolo más aconsejable para algunas aplicaciones.

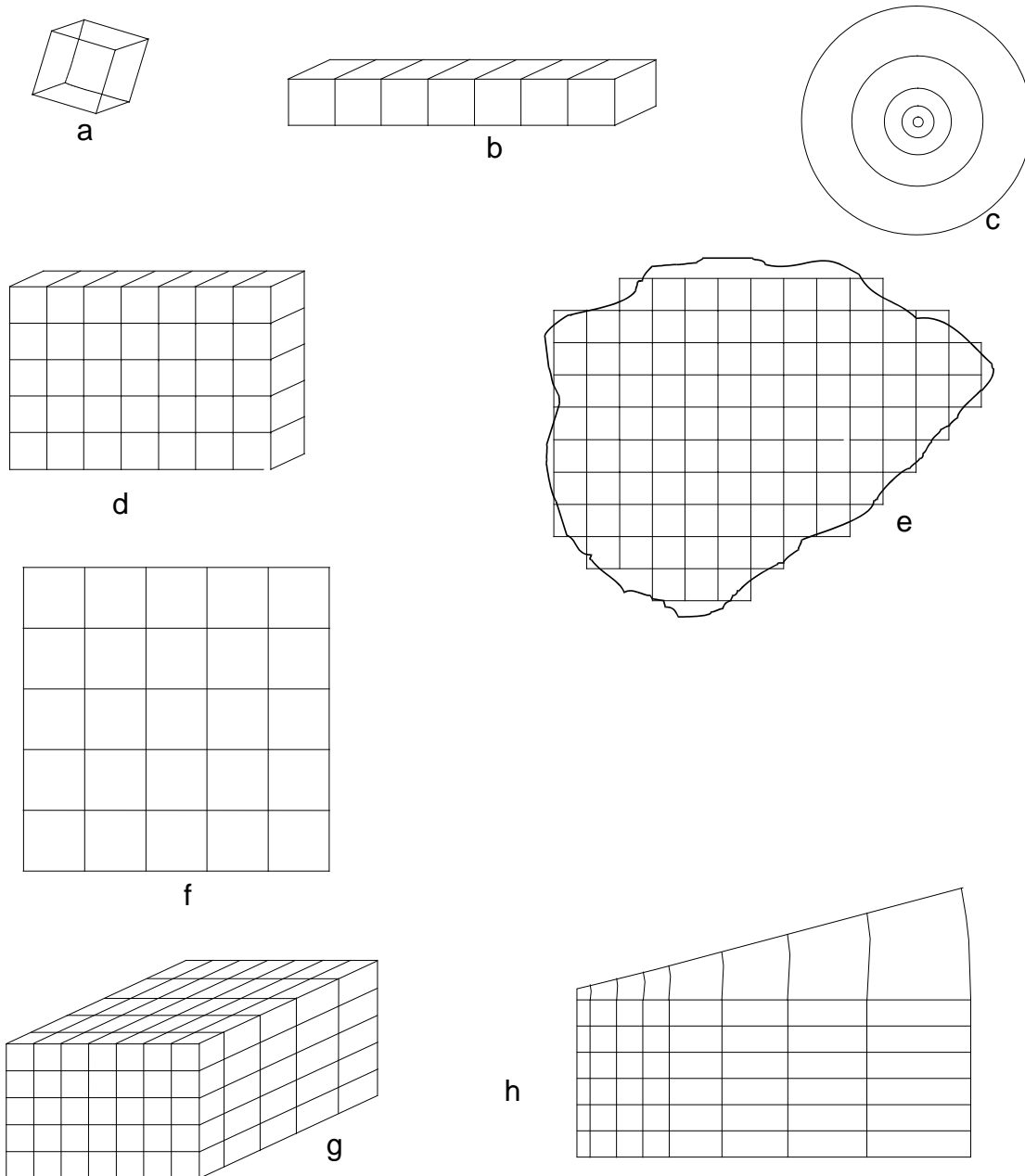


*Modelos seccionales:* Pueden ser usados para evaluar la interacción entre la gravedad, la capilaridad y las fuerzas viscosas, y el efecto de desplazamiento resultante. También es apropiado para estudiar el flujo convergente y divergente.

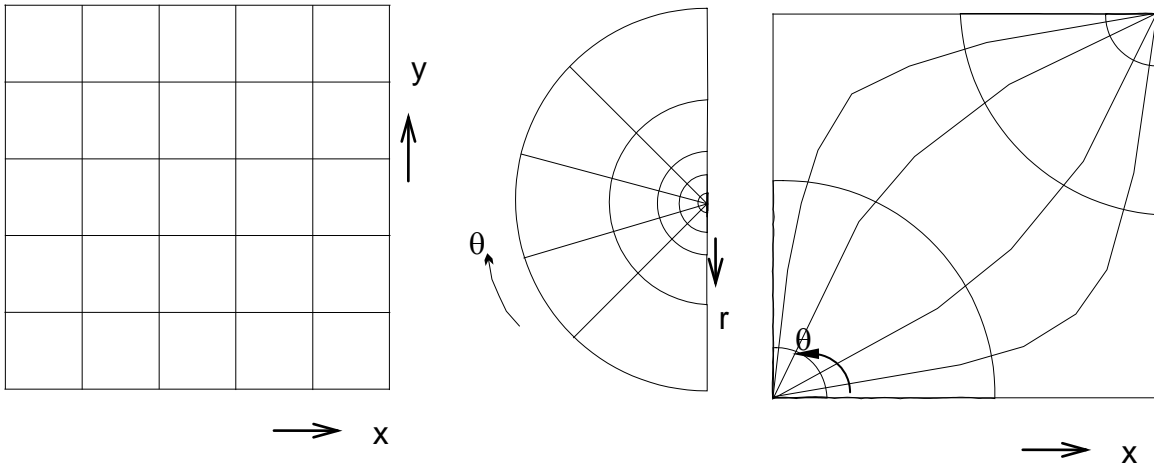
*Modelo tridimensional - 3D:* Se utiliza cuando el yacimiento es demasiado complejo y no puede ser reducido a otros modelos más simples; por ejemplo en casos en que existen barreras al flujo como fallas o zonas impermeables (shales, por ejemplo) en grandes áreas del yacimiento, o dinámica de flujo muy compleja (yacimientos depletados, flujo multifásico, flujo vertical o aleatorio, etc). También se utiliza cuando otros modelos como el seccional o areal, resultan demasiados costosos, o cuando se quiere dar credibilidad al modelo por públicos no familiarizados con técnicas más complejas como la de seudofunciones.

*Modelos multisección:* Es un subtipo del modelo 3D que se utiliza generalmente cuando hay varias zonas productoras o yacimientos independientes en un mismo campo, y necesitan considerarse las posibles influencias entre sí.

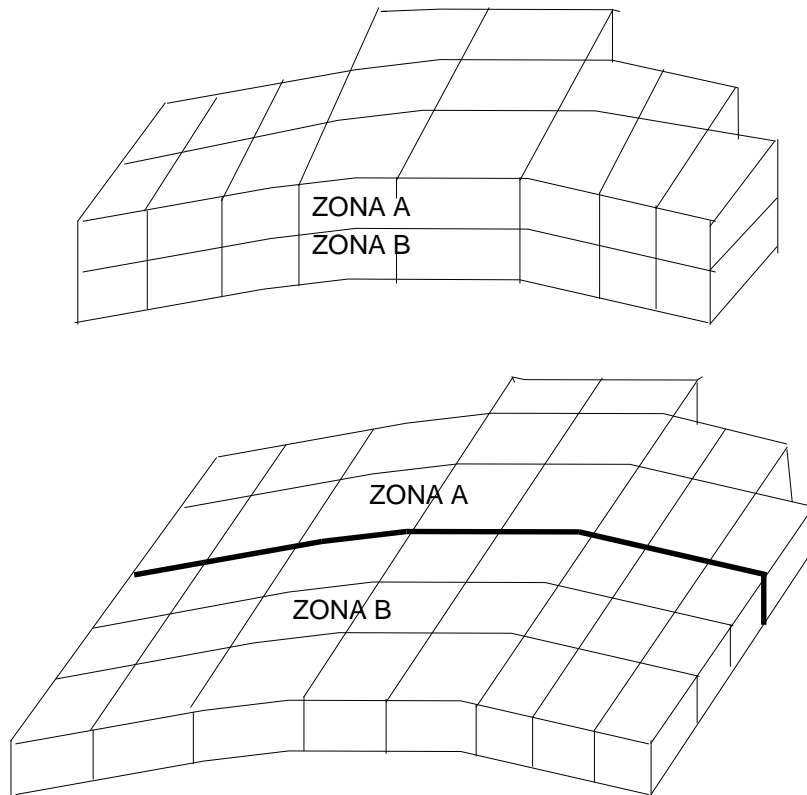
También en las figuras 13 y 14 se muestran algunos modelos areales y seccionales.



**Figura 12.** Modelos típicos usados en Simulación de Yacimientos: a) Tanque, b) 1D, c) 1D radial, d) seccional, e) y f) 2D o areal, g) 3D y h) Seccional-radial.



**Figura 13.** Modelos areales: cartesiano, radial y curvilinear respectivamente.

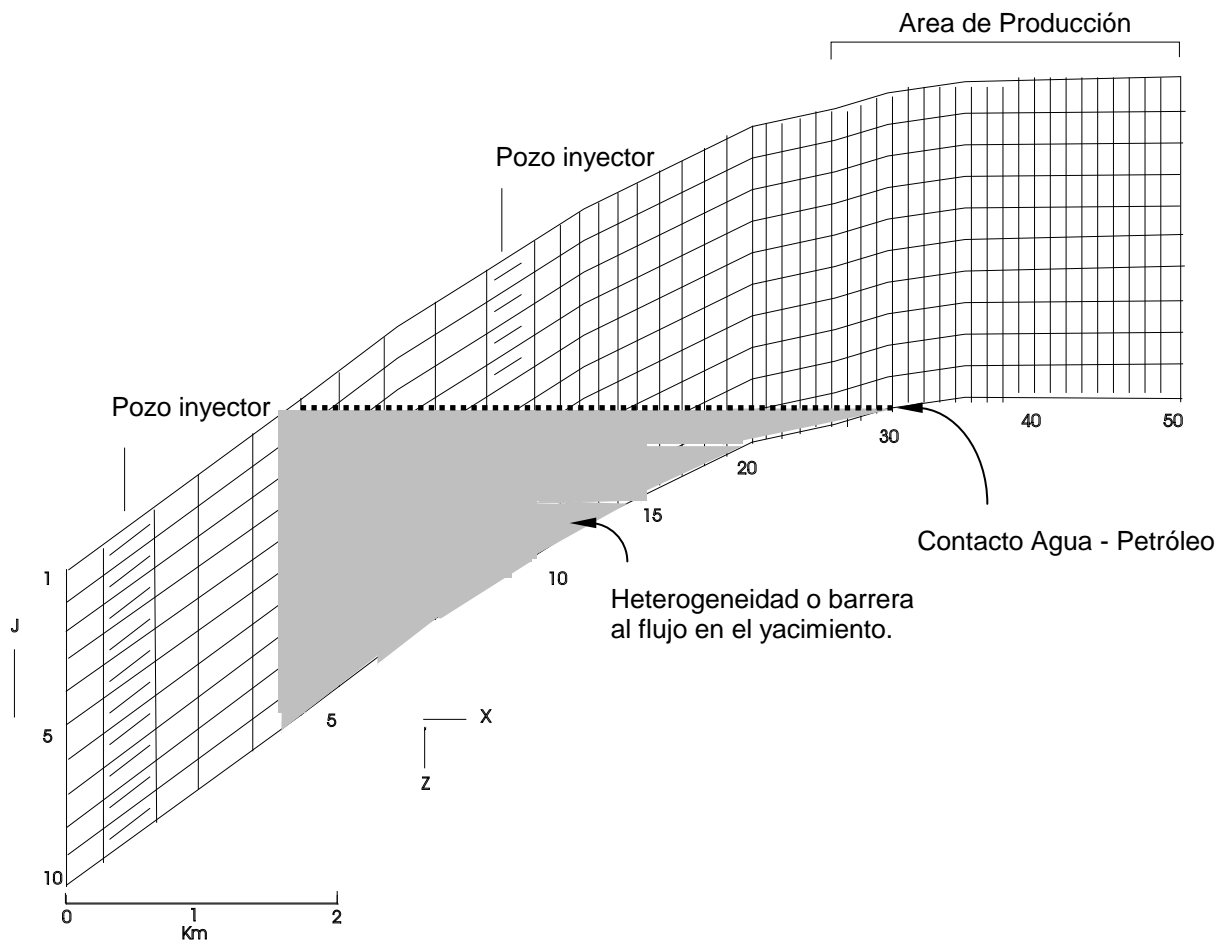


**Figura 14.** Dos formas de dividir un modelo multisección en dos zonas.

#### 2.4.4.2 Simplificación del modelo

La necesidad de simulación asistida por computador ha sido indispensable debido a la complejidad de los estudios de flujo de fluidos en yacimientos heterogéneos. Desarrollar el

modelo más simple pero efectivo es uno de los desafíos más difíciles en Simulación de Yacimientos convirtiéndose esta área en cuna para verdaderos artistas de la ingeniería. Como no es el tema de este trabajo, profundizar en el área del tratamiento adecuado a dar a cada una de las heterogeneidades, mencionaremos algunas de ellas, de las cuales dependerá dicha simplificación: manejo de las permeabilidades relativas; saturaciones y presiones capilares presentes en el flujo multifásico como subproducto del contacto entre cada uno de los entes involucrados en el flujo: el medio físico y cada una de las fases; fuerzas gravitacionales, producto de la interacción dinámica de cada fase; yacimientos con fracturas naturales, quizás el yacimiento más complejo para modelar; propiedades variables de los fluidos (viscosidad, compresibilidad en el gas, factor de formación, solubilidad del gas, etc.); variaciones de permeabilidad y/o porosidad (anisotropía), etc. Para profundizar en su estudio ver el texto de Mattax y Dalton. [Mattax, 1990]. La figura 15, muestra un prototipo simple de un modelo gráfico para el yacimiento.



**Figura 15.** Modelo gráfico típico para un proceso de simulación.

Como se ha mencionado anteriormente, en los últimos años, han sido recurrentes, los análisis y modelos que integran herramientas de muchas disciplinas: Geoestadística, Inteligencia Artificial, Simulación Numérica, etc., para intentar explicar el comportamiento o distribución de las propiedades en yacimientos heterogéneos [He, 2000] [Meisigset, 1999] [Lee, 1998] [Afilaka, 1997] [Bassingthwaigthe, 1994].

#### **2.4.4.3 Selección de los datos para las propiedades de la formación y los fluidos**

Cuando las propiedades de la formación (roca) y los fluidos son uniformes o varían proporcionalmente con la distancia, su aplicación al modelo es directa. Si por el contrario, un cambio significativo en el valor de las propiedades ocurre, se debe modelar con cuidado el valor promedio de la propiedad en cada bloque.

Estudios de sensibilidad serían importantes para reconocer las propiedades más relevantes a considerar en la solución de un problema en particular. Información de la variación de la permeabilidad y porosidad, sería de la más valiosa ayuda, ya que estas dos propiedades son muy importantes. Si estas variaciones no están disponibles, un valor constante se puede asumir, y un modelo homogéneo también puede arrojar valores satisfactorios. Este tipo de estudio también puede utilizarse para examinar el error esperado por datos poco aproximados.

De especial interés resulta la escogencia de los incrementos de espacio y tiempo, debido a que estos son la base de la exactitud, convergencia y estabilidad del modelo [Mattax, 1990] [Aziz, 1978]. La variación de las propiedades de los fluidos y del yacimiento deberán ser correctamente representadas por el modelo en cada bloque e intervalo de tiempo.

Los criterios a seguir para escoger el incremento espacial ( $\Delta x$ ) son:

- Identificar correctamente la distribución de presión en los bloques seleccionados como los más relevantes del yacimiento (fondo del pozo, límites del yacimiento, barreras naturales, frente de agua inyectada, etc.), en determinados intervalos de tiempo también seleccionados. Cuando se trata de una sola fase fluyente, el número de bloques puede ser pequeño para la representación del yacimiento, pero si varias fases están presentes, el modelo, además de hallar la presión, también deberá identificar apropiadamente la distribución de saturaciones en los bloques y tiempos seleccionados, ya que estas determinarán dichas presiones. Una adecuada segmentación de cada región del yacimiento deberá considerarse, disminuyendo el tamaño de cada bloque para evitar algunos de los

problemas inherentes a la discretización mencionados en el apartado 2.4.3.4. Como se dijo anteriormente, el tamaño de los bloques en la zona cercana al pozo, debe disminuirse ostensiblemente porque allí se presenta la mayor variación de presión en el yacimiento como lo muestra la figura 10 [Dake, 1978].

- Describir las propiedades geométricas, geológicas y físicas del yacimiento correctamente: cambios de permeabilidad y porosidad, fallas, etc. Por ejemplo, algunos tipos de fallas o zonas no permeables se representan con bloques donde la permeabilidad es cero.
- Describir la mecánica de los fluidos apropiadamente. Por ejemplo, en el caso de simulaciones de proyectos de inyección de agua, vapor, químicos u otros, se debe tener cuidado con la simulación de saturaciones, el frente del fluido inyectado, la movilidad de las diferentes fases, etc.
- Respetar las ecuaciones y criterios matemáticos deducidos para el simulador, para que este sea aproximado en un rango tolerable y estable.

Los criterios para escoger el incremento de tiempo ( $\Delta t$ ) son:

- Por regla general, siempre se debe tratar de que el incremento de tiempo sea pequeño para asegurar veracidad y convergencia, sin embargo, esto irá en aumento del tiempo de corrida del simulador.
- Si el incremento de tiempo es demasiado grande los errores mencionados en el apartado 2.4.3.4 incrementarán, haciendo que los valores de presión y saturación no representen la realidad del yacimiento.
- Es frecuente utilizar una selección automática del incremento del tiempo, realizada por el mismo simulador de acuerdo a condiciones relacionadas con el cambio de la presión, cambio de saturación, error de truncamiento, etc. Análisis de sensibilidad, como los mencionados al principio de esta sección se pueden realizar para cuantificar el error cometido por la elección de un incremento de tiempo inadecuado.
- En general, el incremento de tiempo puede estar entre uno y tres meses, pero al inicio de la simulación debe disminuir (varias semanas) debido al cambio brusco que se presenta

cuando el yacimiento pasa del completo equilibrio a la producción, permaneciendo temporalmente en un estado inestable con cambios bruscos de sus propiedades.

#### **2.4.5 Ajuste de la Historia de un Yacimiento**

Los yacimientos de petróleo son sistemas tan complejos, que no es suficiente hacer un buen modelo del yacimiento con múltiples datos de confianza, es necesario que el modelo reproduzca la historia del yacimiento, si no hace así, los ajustes o corrección de posibles deficiencias deben hacerse hasta que el modelo pueda, con alto grado de confianza, reproducir dicha historia y predecir el comportamiento futuro del yacimiento. A este proceso se le denomina Ajuste de la Historia del Yacimiento, y puede llegar a ser costoso, demorado y frustrante debido a los problemas para entender ciertos comportamientos muy complejos en un yacimiento [Mattax y Dalton, 1990]. Este proceso, es la fase de la simulación concordante con lo que se denomina: El Ajuste del Simulador, tratado en el apartado 2.3.2.

### **2.5 ALGORITMOS GENÉTICOS**

Enmarcada dentro de las técnicas emergentes de la Inteligencia Artificial y más específicamente, en los dominios de la Computación Evolutiva, los Algoritmos Genéticos se postulan como herramienta de primera mano, tendiente a apoyar la labor científica del nuevo milenio.

#### **2.5.1 Visión General y Definición**

Los Algoritmos Genéticos (AG's) son una novedosa técnica de búsqueda sobre espacios de solución extensos. Su poderío reside en la explotación a nivel de la programación de computadores de ciertos mecanismos que los seres vivientes poseen: la selección natural y la evolución, es decir, los AG's tienen un paralelo biológico. Se presentan principalmente como una herramienta para resolver problemas complejos de optimización, con una convergencia alta y en un tiempo considerablemente menor, que la mayoría de las formas tradicionales de optimización. [Coello, 1995] [Coello, 1994].

Esta técnica se basa en los mecanismos de selección que utiliza la naturaleza, de acuerdo a los cuales los individuos más aptos de una población son los que sobreviven al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno. Hoy en día se sabe que estos

cambios se efectúan en los genes de un individuo (unidad básica de codificación de cada uno de los atributos de un ser vivo), y que sus atributos más deseables (los que le permiten adaptarse mejor a su entorno) se transmiten a sus descendientes cuando éste se reproduce sexualmente.

Otra definición para AG's es [Granados, 1998]:

“Los algoritmos genéticos son programas computacionales cuyo fin es imitar el proceso de "selección natural" que según la teoría de Darwin rige el curso de la evolución. El proceso de selección natural descrito de una manera sencilla es: tienes una población, esa población se multiplica por medio del intercambio de genes (ya sea sexual o asexualmente como las bacterias), de la nueva generación solo sobreviven los más capaces de adaptarse a su medio ambiente, para así formar una nueva población "mejor" que la anterior. Este ciclo se repite a través del tiempo y es como "evolucionamos" nosotros los seres humanos a partir del mono (según Darwin). Sin embargo hay ocasiones en que se producen mutaciones en los individuos lo que origina cambios drásticos en las características del individuo, y con esto se evita que se llegue a un "estancamiento", en la evolución.

El proceso mediante el cual el hombre llegó a tener las habilidades actuales, o los pájaros pudieron tener alas o los peces aletas, etc., puede ser clasificado como un proceso aleatorio, de prueba y error y sin un fin definido, más que el de adaptarse mejor a su medio ambiente sin tomar en cuenta cual era el fin de adaptarse más que la sobrevivencia.

Se dice que el proceso evolutivo es aleatorio en el sentido de que se generan poblaciones cuyas características se parecen a las de sus padres, pero varían aleatoriamente. Luego estas poblaciones son "probadas" en el ambiente para ver cual se "adapta" mejor. Luego sobreviven los que se adapten mejor al medio ambiente, pero no se sabe para que se quiere adaptar al medio ambiente, es decir con que fin. “

John Holland, padre de esta técnica, fue uno de los primeros investigadores que estuvieron conscientes de la importancia de la selección natural o procesos de evolución aplicados a técnicas computacionales, y a fines de la década del 60, desarrolló programas basados en ellas [Holland, 1975]. Se solucionaron problemas complejos que no podían ser solucionados por métodos matemáticos o analíticos, y que la única forma de resolverlos era a través de ensayo y error en base a un criterio de convergencia (Función de Aptitud), en la actualidad los AG's sólo son un rama de una extensa materia conocida como computación evolutiva, que en resumen es la ciencia computacional cuyos algoritmos imitan el proceso evolutivo de la naturaleza.



Su objetivo era lograr que las computadoras aprendieran por sí mismas. A la técnica que inventó Holland se le llamó originalmente "planes reproductivos", pero se hizo popular bajo el nombre "algoritmo genético" tras la publicación de su libro en 1975 [Coello, 1995] [Holland, 1975].

John Koza, de otro lado, presenta la siguiente definición [Koza, 1992]:

“Es un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se les asocia con una cierta función matemática que refleja su aptitud”.

Una definición formal de algoritmo genético fue planteada por Adeli y Hung [Adeli, 1995]. Ellos definen un algoritmo genético como una 9-tupla así:

$$AG = (p^0, l, \lambda, L, f, s, c, m, T)$$

Donde:

$$p^0 = (a_1^0, a_2^0, \dots, a_\lambda^0)$$

Población Inicial

$$l = \{0,1\}^L$$

Codificación de cromosomas

$$\lambda \in \mathbb{N}$$

Tamaño de la población

$$L \in \mathbb{N}$$

Longitud del cromosoma (Núm. de genes)

$$f: l \rightarrow \mathbb{R}$$

Función de “Aptitud”

$$s: l^2 \rightarrow l$$

Operación de selección de padres

$$c: l^2 \rightarrow l^2$$

Operación de cruce

$$m: l \rightarrow l$$

Operación de mutación

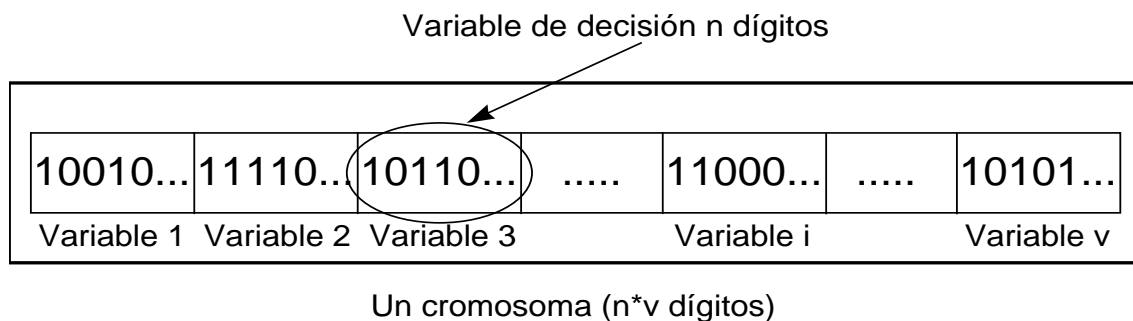
$$T: l^2 \rightarrow \{0,1\}$$

Criterio de terminación

Esta definición considera:

- Existen  $\lambda$  cromosomas en cada población.
- La población inicial  $p^0$  es generada aleatoriamente.
- $a_k^t$  denota el k-ésimo cromosoma en la generación t de la población  $p^t$ .
- Un cromosoma, l, es codificado como una cadena de dígitos binarios de 1's y 0's.
- Sí hay  $v$  variables de decisión en un problema de optimización y cada variable puede ser representada como un número binario de  $n$  dígitos, por ejemplo, entonces un cromosoma es una cadena de  $L = v * n$  dígitos.
- El número de cromosomas (individuos de la población) se puede asimilar como un vector columna  $[a_{k,1}, a_{k,2}, \dots, a_{k,L}]$ .
- El proceso de evolución del algoritmo genético continua ( $T = 0$ ) hasta que el criterio de terminación es encontrado ( $T = 1$ ).

La figura 16 muestra un ejemplo de codificación de  $v$  variables:



**Figura 16.** Codificación de una variable a través de dígitos binarios.

En cuanto a la codificación se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Utilizar el alfabeto más pequeño posible para representar los parámetros (el alfabeto puede ser diferente al binario. Ej. letras, dígitos, etc.). Cada elemento del alfabeto en un cromosoma asume el papel de un gen.
- Las variables que representan los parámetros del problema deben ser discretizadas para poder representarse con cadenas de dígitos. Se debe utilizar suficiente resolución para asegurar que la respuesta encontrada tenga el nivel de precisión adecuado.

- Se debe tener en cuenta el tratamiento de cromosomas o individuos no válidos. A modo de ejemplo, supóngase que se necesitan 400 valores para representar un espacio posible de soluciones. Se requieren por lo menos 9 dígitos binarios, pero con 9 dígitos se pueden obtener 512 valores, es decir, sobrarían 112 valores que deben ser sacados de la nueva población apenas se identifiquen, o ser reemplazados por otros individuos productos de los individuos seleccionados.

## 2.5.2 Componentes básicos de un algoritmo genético

Para la solución de un problema utilizando Algoritmos genéticos se requieren principalmente cinco componentes, las cuales se describen a continuación [Coello, 1994] [Coello 1995] [Mitchel, 1997].

- *Alfabeto*: Lenguaje para codificar las variables de decisión del problema. Puede ser cualquier conjunto de símbolos cuidadosamente seleccionados como los más propicios para la representación de los individuos del problema. Por ejemplo, utilizando el lenguaje binario, si existen  $v$  variables de decisión en un problema y cada variable es codificada como un número binario de  $n$  dígitos, entonces un cromosoma es una cadena binaria de  $n \times v$  dígitos. Ver Figura 16. El cromosoma representará un individuo de la población que contiene todas las posibles soluciones, y que es la que evoluciona en conjunto.
- *Evaluación de la función objetivo*: Esta función es usada para evaluar las variables de decisión dadas y retornar un valor. El valor de la función objetivo de un cromosoma es la "aptitud" del cromosoma, que a su vez es la medición en conjunto del "ajuste" de todas las variables codificadas. La "aptitud" es usada para evaluar la probabilidad de que ese cromosoma sea elegido como cromosoma padre para generar nuevos cromosomas o para ser cromosoma solución.
- *Inicialización de la población*: Es necesario un método para inicializar la población de cromosomas. En general, la población de cromosomas es inicializada de manera aleatoria.
- *Operadores Genéticos*: Es un conjunto de operadores para ejecutar la evolución entre dos poblaciones consecutivas de cromosomas. Los algoritmos genéticos usan técnicas de selección de padres que imitan el proceso de selección natural de cromosomas para crear

una nueva generación, en donde los miembros más aptos se reproducen con mayor frecuencia. Después de la selección de padres, el proceso de cruce es aplicado para combinar dos cromosomas y generar dos nuevos cromosomas a partir de los primeros, cuando un valor aleatorio asociado a ese par es mayor que una tasa de cruce determinada con anterioridad. Después de la operación de cruce se lleva a cabo la operación de mutación, simplemente se altera un símbolo del cromosoma, cuando un número aleatorio, asociado a ese símbolo, es mayor que la tasa de mutación dada. A partir de este operador, pueden incluirse otros, como el de inversión que buscan darle más variedad a la población. Hoy se están definiendo nuevos operadores, entre ellos los denominados operadores inteligentes, que buscan mejorar "inteligentemente" los operadores básicos, para acelerar y optimizar el proceso de evolución [Angeline, 1996] [Koza, 1996]. Así, por ejemplo, en el proceso de mutación no se muta un gen aleatoriamente, sino aquel que haga menos apto al individuo.

- *Parámetros de trabajo:* Un conjunto de parámetros es predefinido para guiar el algoritmo genético, tales como el número de corridas del programa o simulación, el número de poblaciones o generaciones en cada corrida, la longitud de cada variable de decisión codificada como una cadena de símbolos, el número de cromosomas (individuos) a ser generado y operado en cada generación, el proceso y porcentaje de selección, la tasa de cruce, la tasa de mutación y el criterio de parada. Las tasas de cruce y de mutación son usadas como elementos para determinar cuando los operadores deben o no ser aplicados a un par de cromosomas padres. En general, los valores de las tasas de cruce y mutación son asignados como porcentajes que comúnmente varían entre 20 y 40%. El criterio de parada es predefinido teniendo en cuenta el número de iteraciones o el valor de la función objetivo.

### **2.5.3 Operadores Genéticos**

Como se mencionó anteriormente, los operadores genéticos son los motores de la evolución de los cromosomas, convirtiéndose estos en objeto de fuertes debates y profunda investigación, así como un fascinante campo en la ciencia de la computación evolutiva. A continuación mencionaremos los operadores más utilizados:

#### **2.5.3.1 Selección.**

Dado un cromosoma, la evaluación de la función objetivo consiste en asignarle un valor cuantitativo de "adaptación" o "aptitud", el cual se supone es proporcional a la "utilidad" o

"habilidad" del individuo representado. Dependiendo del valor arrojado por esta evaluación, se define cuales son los cromosomas que serán escogidos para reproducirse en una generación posterior.

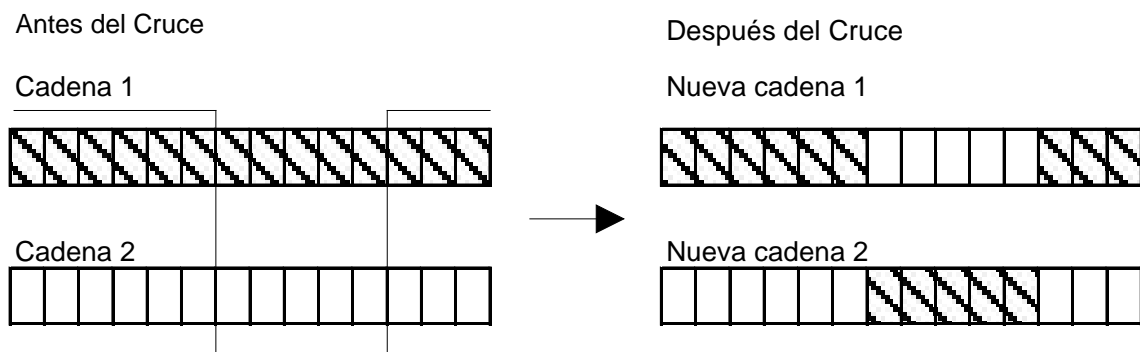
Si  $f(j)$  es el valor de "aptitud" del cromosoma  $j$ , y  $F(p)$  es el valor máximo de la función objetivo, definimos  $f(j)/F(p)$  como la probabilidad de que el cromosoma  $j$  sea seleccionado para ser reproducido. Claramente se ve que aquellos cromosomas con un valor alto de "aptitud" tienen más probabilidad de ser seleccionados.

Los cromosomas seleccionados, no sólo serán los padres de nuevas generaciones, sino que ellos mismos podrían perpetuarse.

### 2.5.3.2 Cruce (Crossover).

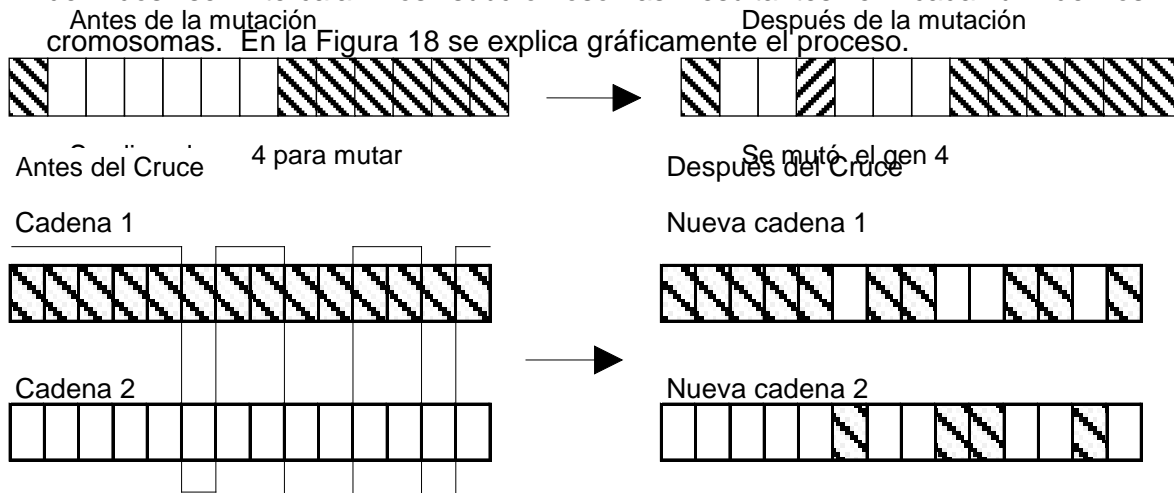
Una vez seleccionados los cromosomas padres o los que van a ser cruzados, el siguiente paso es el del cruce. Se escogen un par de cromosomas de este grupo y se aplican diferentes técnicas de cruzamiento, de las cuales las más comunes son:

- *Dos puntos de cruce*: Consiste en seleccionar aleatoriamente dos posiciones (grupo de genes o símbolos) dentro de los cromosomas a cruzar, una vez definidos estos puntos se unen los subcromosomas que resultan de dicha división intercalándolos en los nuevos cromosomas. El proceso se ve claramente en la Figura 17.



**Figura 17.** Esquema con dos puntos de cruce.

- *Cruce de múltiples puntos*: Es una generalización del anterior, en este tipo de cruce se definen aleatoriamente el número y las posiciones de los múltiples puntos de cruce, una vez definidos se intercalan los subcromosomas resultantes en cada un de los nuevos cromosomas. En la Figura 18 se explica gráficamente el proceso.



**Figura 18.** Esquema con múltiples puntos de cruce.

### 2.5.3.3 Mutación.

Consiste en alterar aleatoriamente un gen dentro de un cromosoma para generar el cromosoma descendiente. El proceso primero determina si existe o no mutación para un cromosoma dado de acuerdo a una tasa de mutación, una vez definido si hay o no cruce se define aleatoriamente la posición en la cual se cambiará dicho gen. La operación de mutación tiene como objetivo diversificar la población de tal manera que sea posible escapar de regiones subóptimas, o máximos locales, del espacio de soluciones factibles. En la figura 19 se ilustra este operador.

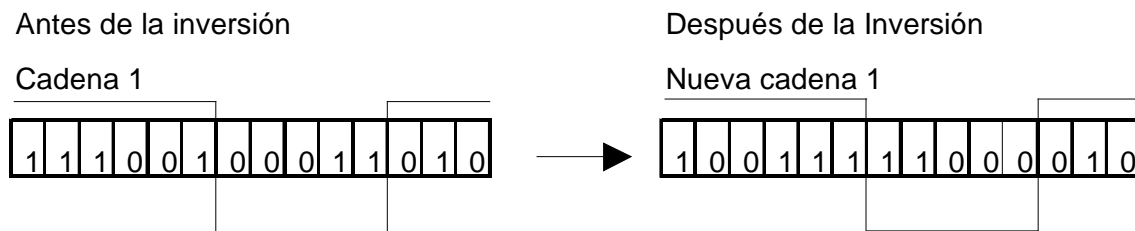
**Figura 19.** Mutación del cuarto gen en un cromosoma.

Puede darse el caso donde el esquema de evolución permita mutar varios genes de un cromosoma.

### 2.5.3.4 Otros operadores "inteligentes".

Día a día se implementan e inventan nuevos operadores genéticos que no son más que innovaciones de los tres operadores básicos mostrados. En particular el proceso evolutivo o la convergencia a una solución óptima de muchos problemas se puede mejorar mediante operadores especializados. El operador genético de la inversión es un ejemplo de un operador que se utilizó mucho anteriormente pero está en desuso. Es una modificación del proceso de cruce, en la cual se invierte el subcromosoma o bloque de genes que va a ser cruzado. El principio bajo el cual se fundamenta esta operación dice que el valor o "aptitud" de un gen dado en un cromosoma no depende sólo de su valor sino de su posición en el cromosoma.

La Figura 20 muestra un cromosoma al que se le aplicó la operación de inversión [Reeves, 1991].



**Figura 20.** Inversión de un bloque de 5 genes en un cromosoma.

#### 2.5.4 Diseño del Algoritmo Genético

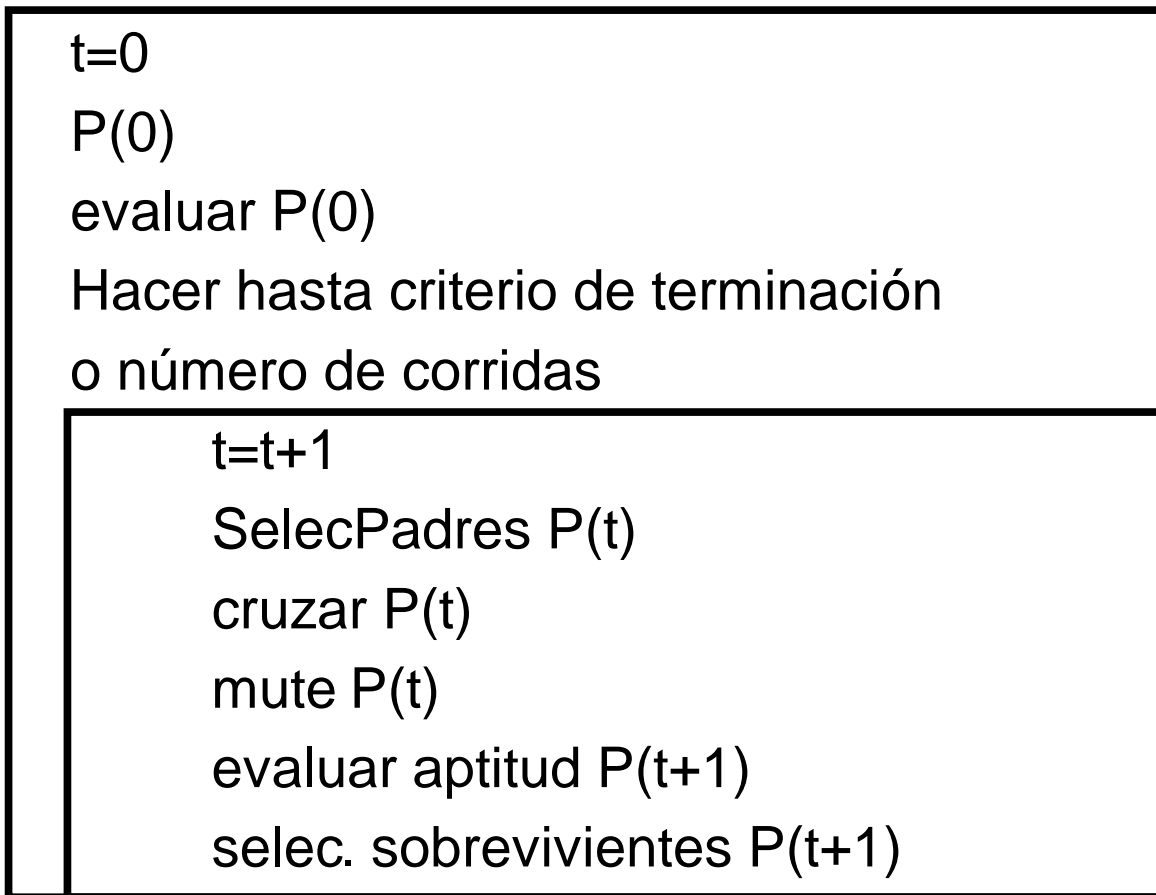
Los AG`s son independientes del dominio de la aplicación. Los pasos a seguir para diseñar un AG son los mismos en cualquier caso y se presentan a continuación :

1. Definir el problema a evaluar (específicamente una función que dependa de los cromosomas  $a_0.. a_\lambda$  ).
2. Definir como se van a codificar los cromosomas o variables (un ejemplo sería de manera binaria).
3. Definir la función de aptitud, para medir el grado de "adaptación" de un cromosoma (individuo), el número de poblaciones para cada corrida, el número de corridas y las tasas de aplicación de los operadores genéticos.
4. Definir la función de selección de padres.
5. Definir la función de cruzamiento (la manera en que se van a intercambiar los genes de los individuos).

6. Definir la función de mutación (cambios aleatorios en los genes de los individuos).
7. Definir otros operadores genéticos a utilizar.
8. Empezar el algoritmo.
9. Generar una población inicial  $p^0$  con valores aleatorios que puedan codificarse de acuerdo a lo definido en 2.
10. Realizar hasta que se cumpla el criterio de parada:
  - a) Evaluar los valores de la población de la generación actual descrita en 9.
  - b) Seleccionar algunos cromosomas en la población con el valor mayor de aptitud como cromosomas padres para reproducir una nueva población de cromosomas hijos.
  - c) Aplicar los operadores de cruce y mutación a los cromosomas padres seleccionados en el paso anterior. Los operadores aplicados a los padres son determinados por valores aleatorios, teniendo en cuenta además las tasas de mutación y cruce definidas con anterioridad.
  - d) Reemplazar toda la población por los cromosomas hijos como la actual generación.
12. Comprobar si se llegó a la "mejor" solución (cumple la función objetivo) o al número máximo de poblaciones o corridas.
13. Si se cumple 12, entonces los valores de los cromosomas darán la mejor solución, si no se cumple 12, regresar al punto 11 con la nueva población como población de inicio, hasta que se llegue a una mejor solución, o se alcance el número de poblaciones o corridas deseado.

En la Figura 21 se puede observar el esquema de funcionamiento de un AG.





**Figura 21.** Esquema general de funcionamiento de un AG.

### 2.5.5 Tipos de Algoritmos Genéticos

Estos son los tipos de AG's más utilizados en la actualidad:

#### 2.5.5.1 Algoritmos Genéticos Generacionales.

También son conocidos como algoritmos genéticos canónicos, son semejantes a la forma como se reproducen los insectos, donde una generación pone huevos, se aleja geográficamente o muere y es substituida por una nueva. Aquí se realizan cruces dentro una piscina de reproducción, los descendientes son puestos en otra, al final de la etapa de reproducción se elimina la generación anterior y se pasa a utilizar la nueva.

#### 2.5.5.2 Algoritmos Genéticos de Estado Fijo.

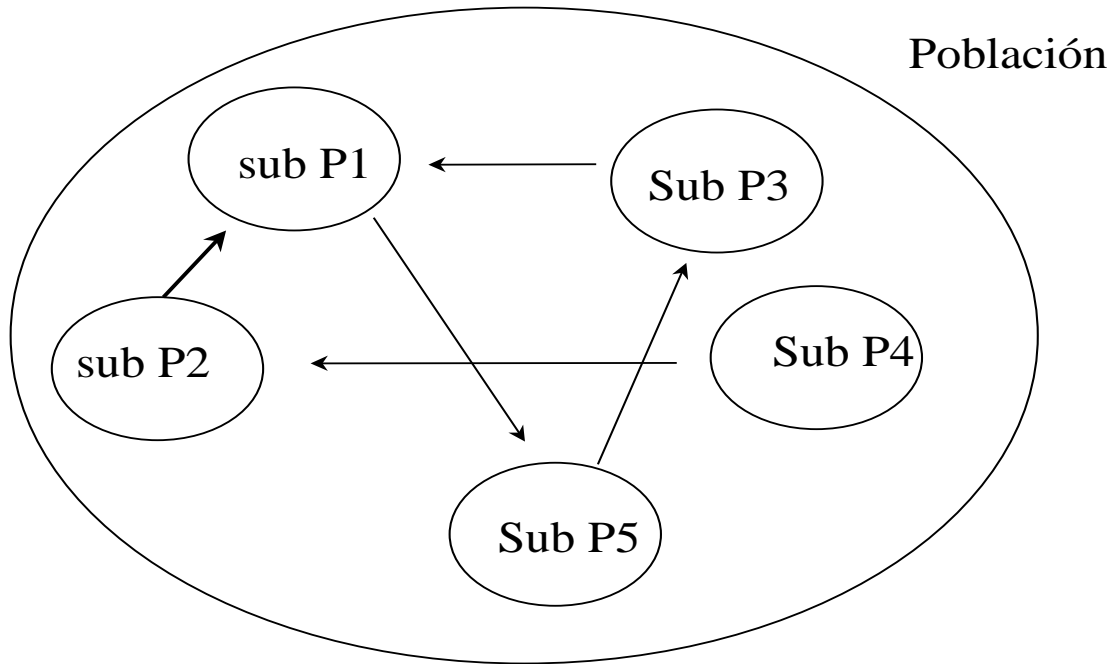
Se rigen por el esquema generacional de los mamíferos o animales de vida larga, donde coexisten padres y sus descendientes, permitiendo que los hijos sean educados por sus

progenitores, pero a la larga se genera competencia entre ellos. En este modelo se seleccionan los individuos que llegaran a ser padres y los individuos que deben eliminarse, para poder hacer espacio a la nueva generación. Aquí las estadísticas se recalculan después de cada cruce y los descendientes nuevos están disponibles inmediatamente para la reproducción. Esto permite al modelo utilizar las características de un individuo prometedor tan pronto como es creado.

### **2.5.5.3 Algoritmos Genéticos Paralelos (AGP's).**

Parte de la metáfora biológica que motivó a utilizar la búsqueda genética consiste en que es inherentemente paralela, donde al evolucionar se recorren simultáneamente muchas soluciones, cada una representada por un individuo de la población. Sin embargo, es muy común en la naturaleza que no solo sea una población evolucionando, sino varias poblaciones, normalmente aisladas geográficamente, que originan respuestas diferentes a la presión evolutiva. Esto origina dos modelos que toman en cuenta esta variación, y utilizan no una población como los anteriores sino múltiples poblaciones concurrentemente. Se presentan a continuación ambos modelos:

- *Modelos de Islas:* Si se tiene una población de individuos, ésta se divide en subpoblaciones que evolucionan independientemente como un algoritmo genético normal. Ocasionalmente, se producen migraciones entre ellas, permitiéndoles intercambiar material genético. Cuando se presenta la migración, el modelo puede sacar provecho de las diferencias en las subpoblaciones, la cual representa una fuente de generación de diversidad genética. Cuando la emigración se presenta en gran cantidad de individuos en cada generación, se produce una mezcla global y se eliminan las diferencias locales. En la Figura 22 se puede observar un modelo de reproducción de AG mediante islas.



**Figura 22.** Modelo de reproducción mediante islas.

- *Modelo Celular.* Se dispone cada individuo en una matriz, donde cada uno podrá buscar reproducirse con los individuos que tenga a su alrededor, escogiendo al azar al mejor adaptado. El descendiente pasará a ocupar una posición cercana. En la figura 23 se puede observar un modelo celular de reproducción de AG.

## Modelo Celular

X1 <sub>ma</sub>	X5 <sub>na</sub>	X2 <sub>ma</sub>		X3 <sub>na</sub>
X4 <sub>ma</sub>		X7 <sub>ma</sub>	x2x7	
x1x4				
		X12 <sub>ma</sub>	X12X22	
		X22 <sub>ma</sub>		

Ma : Mejor Adaptado

Na: No Adaptado

**Figura 23.** Modelo celular de reproducción de un AG.

A pesar de que los AG's son eficientes, las funciones de evaluación de algunos problemas complejos requieren un tiempo de procesamiento considerable. En estos casos el AG necesita grandes cantidades de tiempo de procesamiento para alcanzar una solución satisfactoria. Por esta razón se han desarrollado AG's en computadoras con arquitecturas paralelas que permiten reducir el tiempo de respuesta de los AG's. Uno de los fenómenos más importantes que se observan al utilizar AGP's es que no sólo reducen el tiempo de procesamiento, sino que en muchas ocasiones entregan mejores resultados que los AG's seriales o normales. Este hecho, aunado a la creciente disponibilidad de computadoras paralelas, ha provocado que el número de personas interesadas en los AGPs haya aumentado significativamente en los últimos años. [Cantu, 1995].

### **2.5.6 Areas de aplicación de los AG's**

En general los AG's son una técnica de búsqueda heurística de soluciones, su principal aplicación es en el campo de optimización, también han sido utilizados con éxito en otras áreas. Entre algunas de las aplicaciones más importantes están [Angeline, 1996] [Coello, 1994] [EXPERT, 1993]:

- Aplicaciones Financieras y de Gestión: Ayudan a determinar estrategias óptimas de inversión.
- Aplicaciones de Administración Educativa: Ayuda a determinar los horarios de clase.
- Resolución del problema del agente viajero.
- Para resolver problemas de programación de producción.
- Optimización de consultas en bases de datos relacionales.
- Optimización de funciones.
- Entrenamiento de redes neuronales.
- Sistemas basados en conocimientos para clasificación.
- Prueba y Evaluación de Sistemas que aplican técnicas de aprendizaje de máquina.

### **2.5.7 Ventajas y desventajas respecto a otras técnicas de búsqueda**

- Los AG's son independientes del dominio, no necesitan conocimientos específicos sobre el problema que intentan resolver.
- Los A.G. operan de forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales.

- Cuando se usan para problemas de optimización, por ejemplo, maximizar una función objetivo, los A.G. resultan menos afectados por los máximos locales (falsas o incompletas soluciones) que las técnicas tradicionales, ya que por su naturaleza, opera sobre una vasta zona de posibles soluciones.
- Resulta sumamente fácil ejecutar los A.G. en las modernas arquitecturas masivamente paralelas.
- Los A.G. usan operadores probabilísticos, en vez de los típicos operadores determinísticos de las otras técnicas.
- Los A.G. son robustos ya que se pueden aplicar a una gran variedad de problemas.
- Los A.G. son eficaces y eficientes ya que encuentran buenas e incluso óptimas soluciones al problema presentado y lo hacen en tiempos razonables.
- Los A.G. pueden tardar mucho en converger, o no converger en absoluto, dependiendo en cierta medida de los parámetros que se utilicen: tamaño de la población, número de generaciones, etc.
- La representación de los individuos, en los A.G. puede crear inmensas dificultades si no es bien realizada o es demasiado larga.

## 2.6 PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS.

La programación por objetos (conocida como OOP) nació hace más de veinte años en el lenguaje Simula, que sirve para simular sistemas que, por su complejidad, no pueden ser analizados matemáticamente. Otro objetivo del invento de la OOP, en la década de los 80, fue crear programas altamente reutilizables, hasta el punto de que se habló de "chips" de programación, este resultado surgió como la respuesta a la dificultad que se presentaba cuando se hacían aplicaciones y era difícil reutilizar el "viejo código", y además, estas, estaban totalmente desenlazadas entre sí [Dorsey, 1999] [Pastor 1995] [Brumbaugh 1994].

La gran desventaja de esta nueva tecnología, como muchas otras, fue la dificultad para ser asimilada. Sólo a principios de la década del 90, la OOP, empezó a desplazar fuertemente las viejas técnicas de programación. Lo que la programación por objetos promete es aumentar el grado de modularización de un sistema computacional, lo que es un requisito indispensable para dominar la complejidad de los nuevos programas. Sin programación por objetos será cada vez más difícil producir programas. Sin embargo, la OOP no es una solución total. Es relativamente fácil encontrar ejemplos en que OOP no es solución. Lo que sucede es que la

complejidad de los problemas es cada vez mayor, lo que exige cada vez mejores herramientas para resolverlos, como se mencionó anteriormente.

### **2.6.1. Características de la OOP**

Una cualidad o base de OOP es la abstracción de datos, expresada en los Tipos Abstractos de Datos (ADTs), unida a sus dos cualidades distintivas: Herencia y Polimorfismo [Brumbaugh 1994] [Ege, 1994].

La herencia es una facilidad puramente sintáctica del lenguaje de programación que permite extender un tipo de datos, agregándole al final nuevos campos. El efecto de la herencia puede simularse en la mayoría de los lenguajes tradicionales, pero el resultado es un programa menos elegante.

El otro componente importante de la programación por objetos es el uso del polimorfismo, que se implementa por medio del uso de apuntadores a funciones. Cuando se usa herencia para extender de muchas formas un tipo de datos, puede resultar luego conveniente que el procedimiento que se use para operar sobre un dato dependa del dato en sí, aunque en el programa no esté especificado exactamente cuál es ese procedimiento.

Como los programas modernos necesitan una sofisticada interfaz, casi todos incluyen mucho código que es OOP. Pero lo cierto es que ese código sirve más que todo para que el programa sea amigable, pues el algoritmo que el programa ejecuta en muchos casos no depende de la forma en que se haga la entrada-salida. Como todos los programas modernos usan OOP, se ha generalizado el uso del término "Objeto" para que también incluya paradigmas de uso de programas, con lo que OOP ya no es sólo una tecnología de programación [Ege, 1994].

El campo en que mayor impacto tiene la Programación por Objetos es en el Diseño de Interfaces Hombre-Máquina, pues es muy natural capturar la estructura de los objetos que pueden desplegarse en una pantalla usando una jerarquía de tipos. Pero en casi todos los demás campos el uso de jerarquías no rinde tantos beneficios como en el campo de los gráficos y las pantallas. Sin embargo, como la interfaz de un programa es muy importante, la mayoría de los programadores están aprendiendo a usar las metodologías orientadas a objetos para poder escribir programas que compitan en el mercado. Prácticamente todos los programas modernos deben tener una interfaz programada usando OOP, o de lo contrario el

programa será rechazado por los usuarios finales, lo que en parte explica la atención que ha recibido esta nueva tecnología.

Un lenguaje es orientado a objetos si cumple [Brumbaugh 1994]:

- Soporta objetos que son abstracciones de datos, mediatizados por operaciones, y con estados locales ocultos.
- Los objetos tienen un tipo asociado (clase).
- Los tipos (clases) pueden heredar atributos de supertipos (superclases).

### 2.6.2 El modelo de objetos

El modelo orientado a objetos cuenta con las siguientes características [Brumbaugh 1994] [Ege, 1994]:

- Abstracción
- Encapsulación
- Modularidad
- Jerarquización
- Tipificado
- Concurrencia
- Persistencia

Las cuatro primeras características son esenciales, mientras que las tres últimas son útiles y complementan el modelo.

#### **Abstracción**

Denota las características esenciales que distinguen a un objeto de otros tipos de objetos, definiendo precisas fronteras conceptuales, relativas al observador.

- Surge del reconocimiento de similitudes entre ciertos objetos, situaciones o procesos en el mundo real.
- Decide concentrarse en estas similitudes e ignorar las diferencias.
- Enfatiza detalles con significado para el usuario, suprimiendo aquellos detalles que, por el momento, son irrelevantes o distraen de lo esencial.
- Deben seguir el "principio de mínimo compromiso", que significa que la interfaz de un objeto provee su comportamiento esencial, y nada más que eso. Pero también el

"principio de mínimo asombro": capturar el comportamiento sin ofrecer sorpresas o efectos laterales.

### Encapsulación

Es el proceso de compartimentalización de los elementos de una abstracción que constituyen su estructura y comportamiento. La encapsulación sirve para separar la interfaz de una abstracción y su implementación.

- Es un concepto complementario al de abstracción.
- La encapsulación esconde la implementación del objeto que no contribuye a sus características esenciales.
- La encapsulación da lugar a que las clases se dividan en dos partes:
  - a) Interfaz: captura la visión externa de una clase, abarcando la abstracción del comportamiento común a los ejemplos de esa clase.
  - b) Implementación: comprende la representación de la abstracción, así como los mecanismos que conducen al comportamiento deseado.

Se conoce también como ocultamiento o privacidad de la información.

### Modularidad

Es la propiedad que tiene un sistema que ha sido descompuesto en un conjunto de módulos cohesivos y vagamente conexos.

- Cada módulo se puede compilar separadamente, aunque tengan conexiones con otros módulos.
- En un diseño estructural, modularización comprende el agrupamiento significativo de subprogramas. En diseño orientado a objetos, la modularización debe ceñirse a la estructura lógica elegida en el proceso de diseño.
- Dividir un programa en componentes individualizados reduce en alguna manera su complejidad.
- En **C++** se separan los módulos interfaz de los módulos con implementación, estando los primeros en ficheros con extensión `.h` llamados *header files*, mientras que los segundos se almacenan en ficheros con extensión `.c`, `.cc`, `.cp` o `.cpp`. La dependencia entre ficheros se realiza a través de la macro `#include`.

### Jerarquización

Es una clasificación u ordenación de las abstracciones.



- Por jerarquía denotamos el orden de relación que se produce entre abstracciones diferentes.
- Los tipos de jerarquía más útiles:
  - a) **Herencia** (generalización/especialización, padre/hijo, jerarquía del tipo "es un"...). Una clase (subclase) comparte la estructura o comportamiento definido en otra clase, llamada superclase.
  - b) **Herencia multiple** Una clase comparte la estructura o comportamiento de varias superclases.
  - c) **Agregación** Comprende relaciones del tipo "es parte de" al realizar una descomposición.

### Relaciones entre los conceptos asociados al modelo de objetos.

- Los conceptos de abstracción y encapsulación son conceptos complementarios: abstracción hace referencia al comportamiento observable de un objeto, mientras encapsulación hace referencia a la implementación que la hace alcanzar este comportamiento.
- Existe una tensión entre los conceptos de encapsulación de la información y el concepto de jerarquía de herencia, que requiere una apertura en el acceso a la información.
- **C++** Ofrece mucha flexibilidad, pudiendo disponer de tres compartimentos en cada clase:
  - a) Privado: declaraciones accesibles sólo a la clase (completamente encapsulado)
  - b) Protegido: declaraciones accesibles a la clase y a sus subclases.
  - c) Público: declaraciones accesibles a todos los clientes.

Además de estos tres tipos, soporta la definición de clases cooperativas a las que se les permite acceder a la parte privada de la implementación. Estas clases se denominan *friends*.

### Tipificado

Tipificar es la imposición de una clase a un objeto, de tal modo que objetos de diferentes tipos no se puedan intercambiar, o se puedan intercambiar solo de forma restringida.

- Tipo es una caracterización precisa de las propiedades estructurales y de comportamiento que comparten una colección de entidades.
- Grosso modo, tipo y clase pueden considerarse sinónimos.

- Existen lenguajes fuertemente tipificados (Ada) y débilmente tipificados. Estos últimos soportan polimorfismo, mientras que los fuertemente tipificados no.

En los lenguajes tradicionales como el C++, la sintaxis para ejecutar una operación (método) sobre un objeto, o invocar una de sus propiedades, es de la forma objeto.propiedad u objeto.método. Por ejemplo las operaciones asignar e imprimir el nombre de un profesor *i* en una colección de objetos serían de la forma: **profesor(i).asignar\_nombre**, **profesor(i).imprimir\_nombre**, y para cambiar la propiedad facultad de un profesor sería: **profesor(i).facultad = "M"**, [Ege, 1994].

### **Concurrencia**

Es la propiedad que distingue un objeto activo de uno no activo. Concurrencia permite que diferentes objetos actúen al mismo tiempo, usando distintos threads de control.

### **Persistencia**

Es la propiedad por la cual la existencia de un objeto trasciende en el tiempo (esto es, el objeto sigue existiendo después de que su creador deja de existir) o en el espacio (esto es, la localización del objeto cambia respecto a la dirección en la que fue creado).

### **3. SIMULACIÓN MONOFÁSICO - TRIDIMENSIONAL DEL CAMPO DE GAS GÜEPAJÉ - AYOMBÉ UTILIZANDO UN MODELO GENÉTICO-OBJETUAL.**

*“Este tipo de explicaciones que lo pueden explicar todo en verdad no explican nada.” Carl Sagan.*

Este capítulo describe y muestra la aplicación de un nuevo modelo que utiliza los conceptos vistos en el capítulo 2 y explora las posibilidades de una técnica novedosa, que utiliza los Algoritmos Genéticos y la Programación Orientada a Objetos, para dar solución, en varias etapas, a los problemas de flujo no lineales en yacimientos de gas.

Inicialmente se plantea el problema a solucionar, luego se muestra el modelo genético-objetual para resolver dicho problema, en tres diferentes fases, y finalmente estas se integran, para evaluar y comparar los resultados con los datos reales y de otro simulador numérico tradicional.

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL YACIMIENTO PROBLEMA**

Fue necesario buscar un yacimiento típico que cumpliera con las condiciones de turbulencia que produjera modelos no lineales. Se aplicó la investigación a un caso real colombiano para tratar de que este estudio pueda ser continuado en el futuro.

La empresa ECOPETROL suministró la información del yacimiento de gas Güepajé - Ayombé, ubicado en los límites de los Departamentos de Sucre y Bolívar en la formación Ciénaga de Oro, en jurisdicción de los Municipios San Pedro, Buenavista y Guaymaral entre otros. El yacimiento cuenta con tres pozos perforados desde 1992 con intervalos aproximados de tres años entre cada uno. Desde el Anexo 1 hasta el 6, se muestra la ubicación, mapa estratigráfico y estructural, forma tridimensional e historia de producción del campo y de presiones hasta mediados de 1998. Adicionalmente, en los anexos 7 y 8, se resumen las propiedades del yacimiento y el estado mecánico del primer pozo Güepajé 1, respectivamente.

#### **3.2 PROBLEMA A MODELAR**

El flujo de gas en un medio poroso presenta un nivel de turbulencia que puede considerarse como caótico, conllevando a un modelo no lineal cuando se trata de simular el sistema. Como se mostró en los apartados 2.1 al 2.4, y en especial en el análisis de las ecuaciones 30 y 31, el proceso de simulación depende de múltiples factores y suposiciones realizadas para construir un modelo que converja en el menor tiempo posible sin perder por ello validez o exactitud. Así el problema es simular el comportamiento futuro del yacimiento, información importante en un caso real para proyectar la vida económica del campo a explotar.

Como el principal propósito de esta investigación es medir los alcances reales de la aplicación de herramientas evolutivas a la solución de problemas complejos de difícil solución como los presentados en el flujo turbulento de gas, el yacimiento descrito en la apartado 3.1 se seleccionó por ajustarse a la descripción de un sistema abierto no lineal, permitiendo cuantificar la validez del modelo evolutivo propuesto. La mayoría de las propiedades físicas del yacimiento y del gas, su geometría espacial, así como las del comportamiento del flujo durante la mayor parte de la vida del campo Güepajé - Ayombé estuvieron disponibles para hacer dicho examen.

### 3.3 MODELO PARA LA SIMULACIÓN DEL CAMPO GÜEPAJÉ - AYOMBÉ

Se construyó un modelo general para la representar la complejidad de detalle y dinámica en un sistema complejo, el cual puede observarse en la figura 24, este modelo es la base conceptual de los submodelos y aplicaciones realizadas para resolver el sistema problema descrito en el apartado anterior. La solución del problema se llevó a cabo en 5 etapas:

**Etapas 1.** Se propone un modelo general novedoso, mostrado en la figura 24, que intenta modelar la complejidad dinámica y de detalle en sistemas complejos, en el contexto explicado en el apartado 2.1, el modelo ha sido llamado Modelo Genético-Objetual (OOGM : Object Oriented -Genetic Model) y ya ha sido mostrado a la comunidad científica mundial en varias conferencias en investigación de punta, tanto nacionales como internacionales [Torres, 2000a, b, c, d]. En las tres etapas subsiguientes lo que se hace, es aplicar este modelo general a cada subproblema por separado, integrando finalmente sus soluciones en la etapa final.

**Etapas 2.** Se realizó un submodelo evolutivo para la discretización del espacio, que divide “inteligentemente” el yacimiento en base al comportamiento de las ecuaciones de flujo.

**Etapa 3.** Se realizó un submodelo evolutivo para la solución de sistemas de ecuaciones algebraicas no lineales, estos sistemas aparecen frecuentemente interactuando con sistemas más complejos de ecuaciones diferenciales parciales. Como estos sistemas NL deben resolverse para cada bloque, en cada iteración (en un modelo implícito o explícito) y en cada tiempo, son culpables del excesivo tiempo global de corrida de un simulador y sus resultados alimentan los otros procesos del simulador. Así se propone un modelo evolutivo rápido y que arroja resultados confiables para cuando otros métodos como el de Newton-Rapson, fallan.

**Etapa 4.** Se realizó un submodelo evolutivo, para la solución de la distribución de las presiones a través del yacimiento, que equivale a decir: la solución de las ecuaciones numéricas implícitas no lineales resultantes de la discretización de la ecuación diferencial parcial original.

**Etapa 5.** Finalmente se implementaron e integraron los tres submodelos anteriores para resolver el problema complejo de flujo para el yacimiento de gas descrito.

Fuera del paradigma evolutivo, los modelos utilizan para su representación del fenómeno la Programación orientada a Objetos, que hace ver el modelo general evolutivo mucho más natural, sencillo e íntegro.

### **3.3.1 Modelo Genético-Objetual (OOGM): Un Modelo Evolutivo Orientado a Objetos**

Un modelo general desarrollado para modelar sistemas complejos, aplicado principalmente a sistemas naturales, debe representar el sistema en su estructura y dinamismo. Utilizando el Paradigma Orientado a Objetos (OOP), los componentes de un sistema se pueden representar con sus propiedades y funciones mediante un esquema objetual. El paradigma OOP, no sólo ha mostrado su valor en las últimas décadas por su capacidad de modelación sino que extendiéndolo e integrándolo con otros paradigmas como el de la computación evolutiva, ha mostrado ser una forma sencilla y natural de representar sistemas complejos cuyos componentes evolucionan hacia una solución satisfactoria del sistema como un todo. Esta asociación se propuso en [Torres, 2000a, b, c, d] y [Torres, 1999], como el modelo genético objetual (OOGM), con el se pueden llegar a modelar sistemas dinámicos, tanto en su complejidad dinámica como en su complejidad de detalle, al representar el cambio de los objetos con sus propiedades y funciones moviéndose a estados determinados por leyes no lineales (como en un ecosistema coevolutivo) o a estados mejores o más cercanos a un óptimo global (como en el caso de búsqueda del estado óptimo de un sistema no lineal). el poder de

combinar la OOP y la Inteligencia Artificial, fue explorada inicialmente por Tello [Tello, 1989], quien aplicó inicialmente esta conjunción a sistemas expertos y sistemas de aprendizaje. sin embargo el campo adolece de pocas publicaciones y es una base para la nueva generación de lenguajes científicos.

Dorsey y Hudicka, [Dorsey, 99], también nos dan un ejemplo de integración logrado entre otros dos paradigmas diferentes, fusionan la modelación OOP y el paradigma relacional para bases de datos, aprovechando el lenguaje de modelación unificado (UML por sus siglas en inglés) y la tecnología ORACLE, ellos dicen respecto a esta integración:

"Lógicamente, los datos y el código no debieran ser tenidos en cuenta de manera separada. La idea de la orientación a objetos de que las entidades de datos y sus respectivas operaciones y métodos se deben considerar al unisono es una aproximación mucho más lógica y natural."

"Las mejoras en las velocidades de desarrollo y de mantenimiento que esperamos van a ser una consecuencia de esta filosofía más natural de modelamiento. Cuanto mayor sea la desconexión entre la forma en que pensamos sobre nuestros sistemas y las herramientas que estemos utilizando, mayor será el tiempo que nos lleve el desarrollo. Si conseguimos que el Sistema Manejador de la Base de Datos Relacional (RDBMS) y las herramientas sean más consistentes con esta metodología orientada a objeto, seremos capaces de construir mejores sistemas con mayor rapidez."

También muestran la forma en que el universo de la modelación y simulación del mundo real por computador se mueve rápidamente hacia la integración de paradigmas. Aunque mencionan también algunas limitantes, que hoy están todavía en espera para ser resueltas satisfactoriamente, como son el tipo de relaciones que se pueden representar y la modelación de sistemas de información dinámicos. En esta dirección marcha el modelo genético-objetual OOGM, mencionado anteriormente, que aunque, no podría llegar a resolver estas dos dificultades de entrada, si abre un camino amplio que puede servir como un apoyo para ello.

Como también se mencionó antes, las tres etapas o submodelos siguientes, son una simple aplicación especializada del modelo general OOGM.

# Información de y para otros sistemas representados de igual forma

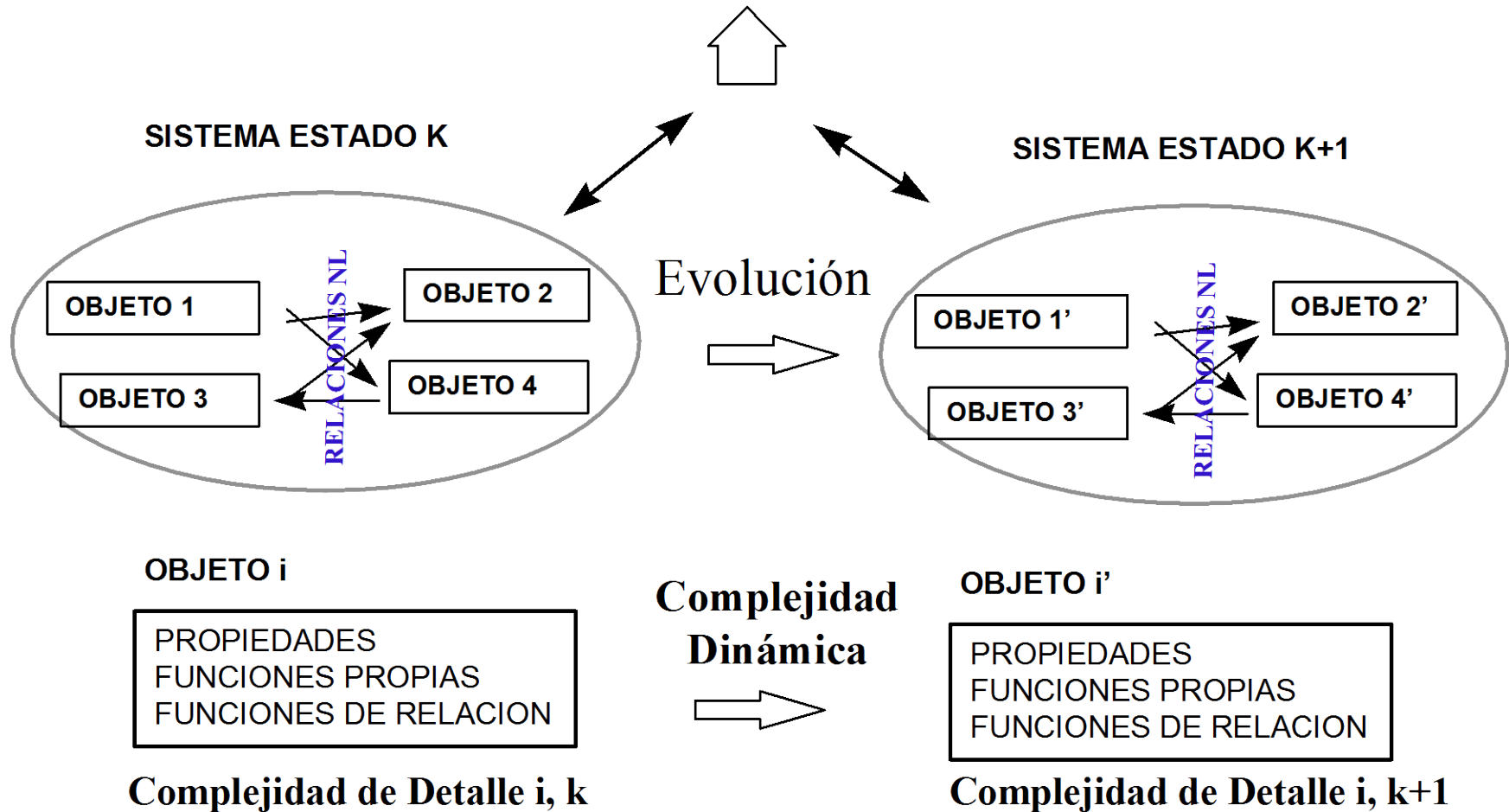


Figura 24. Modelo Evolutivo Orientado a Objetos (OOGM) para un sistema complejo a optimizar.

### 3.3.2 Discretización Evolutiva del Yacimiento

El yacimiento fue sometido a un proceso de división, utilizando la sección estratigráfica del Anexo 2 y un programa de computador alimentado con los datos de los extremos en las secciones  $xy$  y  $xz$  del yacimiento y la ubicación de los pozos. El programa halla la división óptima por medio de una distribución logarítmica de intervalos de espacio, escogida al azar, de una población posible que va evolucionando de acuerdo a una función de ajuste, la cual tiene como su principal componente, el número de intervalos en las direcciones donde hay mayor variación de flujo, y sería fácil incluir también intervalos de tiempo en caso que se necesite hacer análisis de estabilidad en la convergencia de la solución del modelo.

#### 3.3.2.1 Consideraciones básicas para la división del yacimiento

En la realidad los yacimientos sufren procesos dinámicos en tres dimensiones, sin embargo, en muchas situaciones, se puede suponer que en una dimensión el flujo es bajo o despreciable comparada con el flujo en las otras dos ; así, se podría modelar el proceso dinámico con un modelo bidimensional. De acuerdo al Anexo 4, la forma tridimensional del yacimiento problema, muestra que el flujo en las direcciones perpendiculares al pozo ( $x, y$ ), serán las más influyentes respecto del flujo en la dirección  $z$ .

Existen tres tipos de casos problemas que se pueden manejar con esta suposición y que se pueden observar en las figuras 12 y 13 del apartado 2.4.4.1:

*Problemas Areales ( $x,y$ ):* Aplicable a yacimientos delgados muy extensos horizontalmente, se puede suponer que los gradientes de presión en la dirección  $z$  (vertical) es despreciable respecto a los valores en las otras dos.

*Problemas Seccionales ( $x,z$ ):* Si en vez de ignorar el flujo en la dirección  $z$ , resulta que, el flujo en una de las dos direcciones horizontales es despreciable en comparación con el flujo en dirección vertical y con el flujo en la otra dirección horizontal, llegaremos a un modelo de bloques verticales.

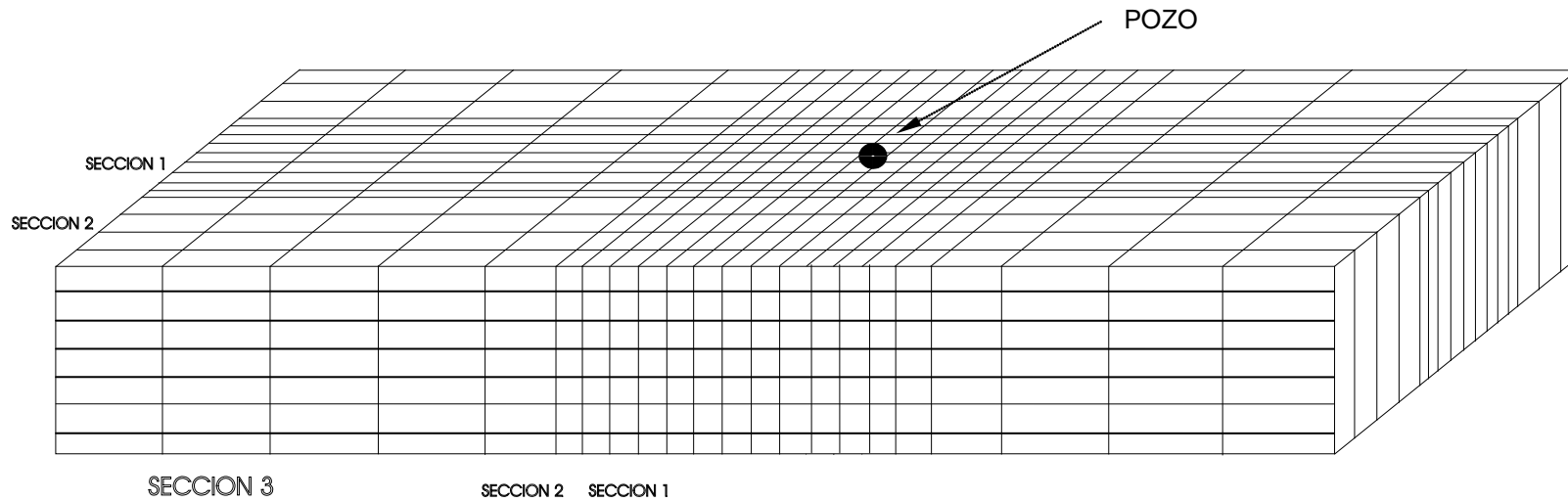
*Problemas Mono-pozo ( $r,z$ ):* El yacimiento tiene un único pozo al cual fluyen los fluidos del yacimiento en forma radial.



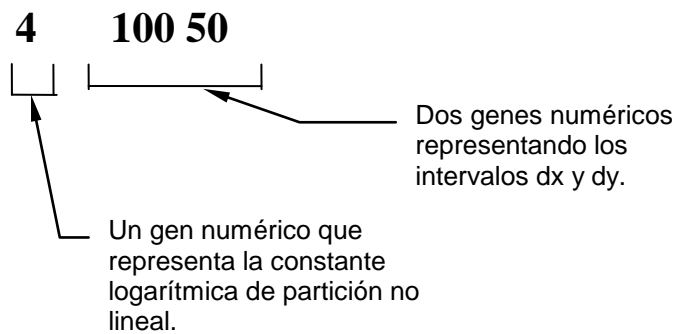
Sin embargo, el yacimiento mostrado, en el Anexo 4, presenta el inconveniente de producir desde varias formaciones diferentes lo cual dificulta el modelo bidimensional, así se utilizó un modelo tridimensional como el mostrado en la Figura 25, para lograr un mejor detalle en la simulación multicapa. En la figura 26 se muestra la forma del cromosoma para el modelo, aunque se consideró sólo la adaptación de los intervalos  $dx$  y  $dy$  a través del espacio 3D de acuerdo a lo discutido arriba, el modelo fácilmente pudiera aceptar la adaptación del intervalo  $dz$ , y otras variables influyentes en la solución como intervalos de tiempo u otros parámetros no lineales que reflejen heterogeneidades, anisotropías, etc.

### **3.3.2.2 Algoritmo Genético-Objetual para la particion espacial del yacimiento.**

Como se mencionó anteriormente, la forma de hacer la discretización o partición (gridding) del yacimiento con el propósito de resolver las ecuaciones de flujo numéricamente, se torna en una tarea difícil, ya que de su número y distribución depende en gran parte la posibilidad de que el simulador converja a resultados confiables en un tiempo que disminuya errores de redondeo y costos, como fue discutido en el apartado 2.4.3.6. Las técnicas “adaptativas” para simulación de yacimientos se empezaron a usar a partir de 1983 [Thomas, 1983], en este caso se trataba de usar modelos principalmente implícitos, donde el grado de implicitud intentaba, por un lado, que el modelo fuera estable dentro de las condiciones mínimas, y por otro lado, que el tiempo de cómputo fuera mínimo evitando adicionalmente el error de redondeo, para esto, el modelo iba adaptando este grado de implicitud en cada una de las ecuaciones numéricas a solucionar. Grandes problemas, donde adicionalmente al problema del flujo multifásico, se consideraban problemas composicionales del fluido y problemas de transferencia de calor; generando en su conjunto simuladores que demandaban excesivo tiempo de cómputo y errores de redondeo, fueron mejor resueltos usando esta técnica [Viera, 1990]. Con las nuevas herramientas gráfico-matemáticas-computacionales, nuevas formas de división hacen su aparición día a día, pudiendo adaptar la forma del sistema complejo, “inteligentemente”, a mallas multidimensionales de todas las formas y tipos [Afilaka, 1997].



**Figura 25.** Partición de una superficie 3D (yacimiento petrolífero) en base a una función no lineal. El divisor evolutivo halla el número de secciones óptimo en cada dimensión de flujo junto con los intervalos longitudinales en cada una de estas.



**Figura 26.** Forma del cromosoma para diseñar la partición no lineal.

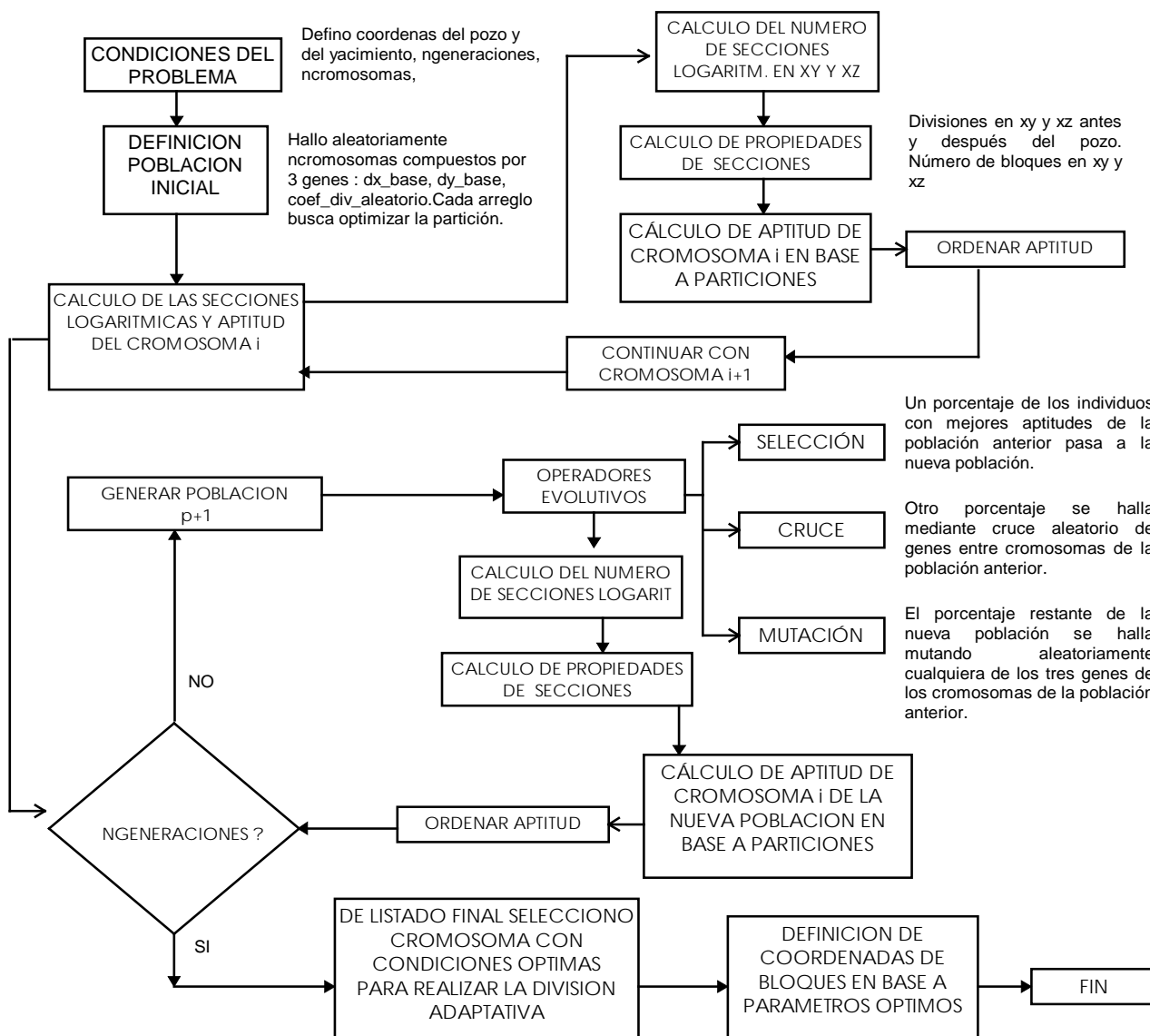
Nosotros buscamos con el método aquí propuesto dar una idea sencilla y fácilmente programable de como los algoritmos genéticos pueden utilizarse en este tipo de representaciones multidimensionales. El algoritmo desarrollado se basa en la distribución no lineal de una propiedad relevante (en este caso la presión), determinante global del comportamiento del sistema, y ayuda a calcular las secciones logarítmicas para dividir el yacimiento. Esta división logarítmica se hace en base a que las ecuaciones que relacionan las propiedades involucradas en el tipo de flujo, generalmente presentan comportamientos o funciones logarítmicas respecto a la distancia, a pesar de que no todas las propiedades cambien de esta manera. Más exactamente lo que se hace, es dividir, la distancia desde el eje "y" y eje "x" hasta el pozo en forma logarítmica, como se muestra en la figura 25. Por ejemplo, el tamaño de los bloques puede variar así: 16, 8, 4, 2, para cuatro secciones respectivamente, siendo las últimas las más cercanas al pozo, según lo describen las ecuaciones dadas posteriormente. El logaritmo de distribución es hallado aleatoriamente de acuerdo a las necesidades impuestas por la función de ajuste, en este caso, se ordenan todas las posibles distribuciones de acuerdo a la suma del número de "filas" de bloques en las secciones halladas para las direcciones "x" y "y". En la figura 27 se muestra el algoritmo de la aplicación realizada para implementar el divisor evolutivo. En la Tabla 1, podemos observar la lista final ordenada por la función de ajuste, de dos corridas diferentes del divisor evolutivo ; y en la Tabla 2, el resultado de la distribución espacial que arroja uno de los individuos de la lista anterior. Con un archivo que muestra los resultados, de la forma que se presentan en la Tabla 1, el analista que realiza la simulación, podrá escoger, a gusto y comodidad, la distribución de intervalos más óptima a su juicio; porque podría suceder que la primera en la lista, que es la que genera menor número de filas de bloques, genere unos intervalos demasiado grandes, haciendo que las propiedades se discreticen de una manera muy "brusca"; así este archivo, es una herramienta útil para observar un conjunto de distribuciones posibles y seleccionar la más indicadas pudiendo, experimentar con cada una de ellas, para observar cuál es la que realiza mejor el proceso de simulación.

Utilizando los coeficientes logarítmicos, aleatoriamente definidos, **C\_log1**, el cual define el número de secciones para dividir el intervalo longitudinal mayor, y **C\_log2**, para lograr mayor variación dentro de una sección cuando sus intervalos son demasiado grandes (se hizo 1 para el problema tratado, ya que sólo se necesitó la división que se lograba con **C\_log1**, podría necesitarse en otros casos donde se necesita mayor nivel de partición), las cuales pueden variar en un amplia gama de valores enteros, para generar funciones logarítmicas como lo

describen las ecuaciones 34 y 35 (las cuales se refieren al objeto yacimiento: **yac**, y el objeto pozo : **pozo(i)**), **ap** significa antes del pozo - Observar final del apartado 2.6 para más información sobre nomenclatura de objetos), junto con la variación de **dx y dy**, se construyó el modelo genético para el encuentro de las mejores combinaciones de variación de las secciones e intervalos espaciales a través del yacimiento, y de los intervalos de tiempo. Estas combinaciones “más aptas” podrían ser utilizadas, en orden descendente de aptitud de acuerdo a las necesidades de estabilidad del simulador de solución general, y del número de operaciones a realizar.

En la página anterior se dijo que la función de aptitud inicialmente mantiene el número de operaciones bajo al reducir el número de intervalos de longitud, pero también serviría en un simulador no implícito totalmente, para el caso en que se afecte la estabilidad, la función de aptitud ayudaría a buscar otras cromosomas, que conllevarían a divisiones con más intervalos, manteniendo la estabilidad, pero sin desmejorar mucho la función de aptitud.

El cromosoma mostrado en la Tabla 2, se escogió por sus características especiales, su función de ajuste aceptable, y sus intervalos no muy grandes, y corresponde al individuo 35 de la corrida 1, como el más óptimo y apropiado para la solución del problema de partición planteado, sus valores  $dx$  y  $dy$  permiten tener una aceptable partición cerca al pozo, lo cual no lo permiten, sobre todo en el eje  $y$ , los primeros 34 individuos, ya que su intervalo en  $y$  de 1000 pies discretizaría sólo en dos bloques en dicha dirección dando un intervalo muy largo sobre todo en la parte cercana al pozo (1000 pies), lo cual no sería eficiente para simular el cambio de la función no lineal. Así, aunque algunos bloques optimizan el número de bloques para disminuir los cálculos realizados, se debe estar atento a que el individuo elegido mantenga el cambio a través del sistema.



**Figura 27.** Algoritmo General para el divisor espacial evolutivo.

El divisor utilizó 40 cromosomas y 10 generaciones;  
 rata\_selección=20%, rata\_cruce=40% y rata\_mutación=40%.

Estos factores se hallaron heurísticamente. Al observar que los primeros cromosomas tenían aptitudes malas en su gran mayoría se dio más prioridad a la búsqueda de nuevos individuos mediante el cruce y la mutación.

**Tabla 1.** Lista final ordenada por ajuste después de división evolutiva (10 generaciones, 40 cromosomas).

**Corrida 1.**

Individuo	dx	dy	C_log1	Ajuste
1	7700	1000	3	7
2	7700	1000	3	7
3	7700	1000	3	7
4	7700	1000	3	7
5	7700	1000	3	7
6	7700	1000	3	7
7	7700	1000	3	7
8	7700	1000	3	7
9	7700	1000	3	7
10	7700	1000	3	7
11	7700	1000	3	7
12	7700	1000	3	7
13	7700	1000	3	7
14	7700	1000	3	7
15	7700	1000	3	7
16	7700	1000	3	7
17	7700	1000	3	7
18	7700	1000	3	7
19	7700	1000	3	7
20	7700	1000	3	7
21	7700	1000	3	7
22	7700	1000	3	7
23	7700	1000	3	7
24	7700	1000	3	7
25	7700	1000	3	7
26	7700	1000	3	7
27	7700	1000	3	7
28	7700	1000	3	7
29	7700	1000	3	7
30	7700	1000	3	7
31	7700	1000	3	7
32	7700	1000	3	7
33	6600	1000	2	16
34	2200	1000	4	17
35	3300	400	3	20
36	2200	400	3	22
37	2200	200	2	32
38	550	133.33	4	55
39	733.33	80	3	59
40	733.33	100	3	59

## Continuación Tabla 1.

## Corrida2.

Individuo	dx	dy	C_log1	Ajuste
1	7700	1000	3	7
2	6600	1000	3	7
3	7700	1000	3	7
4	6600	1000	3	7
5	7700	1000	3	7
6	6600	1000	3	7
7	7700	1000	3	7
8	6600	1000	3	7
9	7700	1000	3	7
10	6600	1000	3	7
11	7700	1000	3	7
12	6600	1000	3	7
13	7700	1000	3	7
14	7700	1000	3	7
15	6600	1000	3	7
16	6600	1000	3	7
17	7700	1000	3	7
18	7700	1000	3	7
19	7700	1000	3	7
20	7700	1000	3	7
21	7700	1000	3	7
22	7700	1000	3	7
23	7700	1000	3	7
24	6600	1000	3	7
25	7700	1000	3	7
26	7700	1000	3	7
27	7700	1000	3	7
28	6600	1000	3	7
29	7700	1000	3	7
30	7700	1000	3	7
31	7700	1000	3	7
32	6600	1000	3	7
33	7700	400	3	15
34	7700	400	2	26
35	2200	400	2	34
36	2200	400	2	34
37	550	200	3	49
38	733.33	133.33	2	101
39	440	133.33	2	101
40	440	400	3	109

**Tabla 2.** Resultados de la distribución espacial para uno de los individuos de la Tabla 1.

Individuo	dx	dy	C_log1	Ajuste
35	3300	400	3	20

**a) Datos de entrada**

pozo(1).x = 12000: pozo(1).y = 1400: pozo(1).h = 700: npozos = 1

dx = 3300: dy = 400: c\_log1 = 3: c\_log2 = 1

pozo(1).bloque\_i = 4 : pozo(1).bloque\_j = 4

**b) Distribución Espacial hallada****Antes del pozo**

yac.secciones_xy_ap		yac.secciones_xz_ap	
2		2	
<b>i</b>	<b>sec_xy(i)_ap.bloques_div</b>	<b>sec_xy(i)_ap.dy</b>	
1	3	133.33	
2	3	400	
<b>i</b>	<b>sec_xz(i)_ap.bloques_div</b>	<b>sec_xz(i)_ap.dx</b>	
1	3	1100	
2	3	3300	

**Después del pozo**

yac.secciones_xy_dp		yac.secciones_xz_dp	
2		4	
<b>i</b>	<b>sec_xy(i)_dp.bloques_div</b>	<b>sec_xy(i)_dp.dy</b>	
1	1	400	
<b>i</b>	<b>sec_xz(i)_dp.bloques_div</b>	<b>sec_xz(i)_dp.dx</b>	
1	3	3300	
2	3	9900	
3	1	9900	

**20 líneas de bloques ( 7 para plano xy y 13 para plano xz, 12 antes y 8 después del pozo.)**



Las ecuaciones utilizadas en su forma objetual fueron:

a) *Cálculo del número de secciones logarítmicas en los planos xy y xz antes del pozo*

$$\text{yac.secciones\_xy\_ap} = \text{Int}(\text{Log}(\text{pozo}(\text{np}).\text{bloque\_j}) / (\text{Log}(\text{C\_log1}))) + 1 \quad (34)$$

$$\text{yac.secciones\_xz\_ap} = \text{Int}(\text{Log}(\text{pozo}(\text{np}).\text{bloque\_i}) / (\text{Log}(\text{C\_log1}))) + 1 \quad (35)$$

np, considera si hay varios pozos, aunque en el caso de esta investigación np=1. El bloque\_i y bloque\_j, son los bloques con intervalo inicial (dx\_inicial y dy\_inicial respectivamente), en las direcciones “x” y “y”, donde se encuentra el pozo. El cálculo para el número de secciones después del pozo en cada plano tiene una forma similar, pero se reemplaza el número de bloques a seccionar (pozo(np).bloque\_j y pozo(np).bloque\_i), por la parte restante : bloques\_j - pozo(np).bloque\_j, y bloques\_i - pozo(np).bloque\_i.

b) *Cálculo de las propiedades de las secciones en el plano xy*

$$\text{sec\_xy}(i)\_ap.\text{bloques} = \text{C\_log1} \wedge (i - 1) \quad \text{'Bloques originales}$$

$$\text{sec\_xy}(i)\_ap.\text{dy} = \text{dy\_inicial} / \text{C\_log2} \wedge (\text{yac.secciones\_xy\_ap} - i)$$

$$\text{sec\_xy}(i)\_ap.L = \text{sec\_xy}(i)\_ap.\text{bloques} * \text{dy\_inicial}$$

$$\text{sec\_xy}(i)\_ap.\text{bloques\_div} = \text{Int}(\text{sec\_xy}(i)\_ap.L / \text{sec\_xy}(i)\_ap.\text{dy}) \quad \text{'Bloques subdivididos}$$

c) *Cálculo de las propiedades de las secciones en el plano xz*

$$\text{sec\_xz}(i)\_ap.\text{bloques} = \text{C\_log1} \wedge (i - 1) \quad \text{'Bloques originales}$$

$$\text{sec\_xz}(i)\_ap.\text{dx} = \text{dx\_inicial} / \text{C\_log2} \wedge (\text{yac.secciones\_xz\_ap} - i)$$

$$\text{sec\_xz}(i)\_ap.L = \text{sec\_xz}(i)\_ap.\text{bloques} * \text{dx\_inicial}$$

$$\text{sec\_xz}(i)\_ap.\text{bloques\_div} = \text{Int}(\text{sec\_xz}(i)\_ap.L / \text{sec\_xz}(i)\_ap.\text{dx}) \quad \text{'Bloques subdivididos}$$

En la Tabla 3 se da un ejemplo de cálculo para distribución de secciones en el plano xy ; y en los anexos 8 y 9, se muestran las discretizaciones gráficas en los planos xy y xz, con intervalos

uniformes y con distribuciones evolutivas usando este modelo. Estos gráficos son producto de la aplicación desarrollada en este proyecto para implementar el modelo. Adicionalmente, en el Anexo 11 se muestra la interacción objetual del divisor evolutivo con los otros objetos del simulador global.

**Tabla 3.** Ejemplo del cálculo de la distribución de secciones e intervalos en el plano xy

	<i>secciones_xy</i>	<i>sec_xy(i)</i>	<i>sec_xy(i).bloques</i>	<i>sec_xy(i).dy</i>	<i>sec_xy(i).L</i>	<i>sec_xy(i).bloques_div</i>
<b>C_log1=2</b>	4	1	1	18.75	150	8.00
		2	2	37.5	300	8.00
<b>C_log2=1</b>		3	4	75	600	8.00
		4	1	150	150	1.00
<b>dy_inicial=</b>	<b>150 (8 bloq.)</b>					

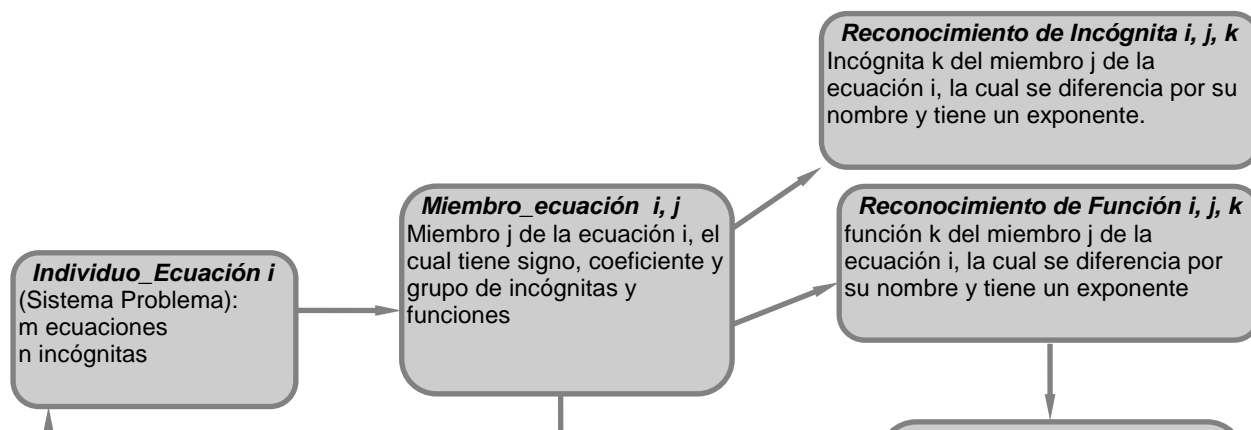
### 3.3.3 Modelo Evolutivo para la Solución de Sistemas de Ecuaciones Algebraicas no Lineales

Debido a que en la simulación de sistemas complejos es común encontrar relaciones no lineales, como en el caso de un yacimiento de petróleo, en esta etapa se pretende mostrar un modelo que solucione el sistema no lineal de ecuaciones algebraicas :  $Ax = B$ , con  $A$  una matriz de coeficientes,  $x$  una matriz no lineal de incógnitas (Ej.  $y^2z^3$ ,  $wy^{0.5}z$ ,  $4\cos(2x^2-x)$ ,  $5\log(x)$ ), y  $B$  un vector unidimensional de términos independientes. Los términos constantes son asumidos por el programa como coeficientes multiplicados por las incógnitas con exponente cero. El sistema a resolver puede incluir ecuaciones con funciones polinómicas, potenciales, logarítmicas, exponenciales o trigonométricas. El sistema lineal es un caso especial con  $A$  una matriz de coeficientes,  $x$  un vector de incógnitas de primer grado, y  $B$  un vector unidimensional de valores constantes. En nuestro modelo el sistema no está atado a la condición de ser linealmente independiente, porque el modelo OOGM (Object-Oriented-Genetic Model) cumple con hallar una o varias soluciones aproximadas para todo el sistema. El modelo OOGM halla al menos una solución para los sistemas con solución conocida; para los que no la tienen, da la solución más aproximada, con su parámetro de ajuste, que de acuerdo al caso y a un análisis, será la solución esperada, o se deducirá que el sistema no tiene una solución. Una de las bondades del modelo OOGM, como en el caso lineal, es la posibilidad de encontrar, la mayoría de las veces, varias soluciones para problemas con múltiples soluciones, así fue el caso para un polinomio de grado cinco para el cual encontró todas las soluciones posibles.

### 3.3.3.1 Modelo General

El planteamiento general del modelo OOGM se basa en la existencia de un problema con comportamiento no lineal, que ya esté expresado en un sistema de  $m$  ecuaciones matemáticas con  $n$  incógnitas. Cada una de las ecuaciones de este sistema se considera un conjunto con una cardinalidad igual al total de miembros y términos independientes de la ecuación. Entre los elementos de este conjunto de miembros puede encontrarse varias veces una misma incógnita y pueden aparecer diferentes constantes independientes, y el método de solución que proponemos funciona adecuadamente. Si se usa un sistema de ecuaciones completamente reducido, se obtiene el óptimo rendimiento computacional. El modelo OOGM, además reconoce incógnitas, signos, coeficientes, exponentes y funciones con sus argumentos, de los respectivos miembros.

A todas las incógnitas componentes de esta arquitectura de miembros se les asigna valor de forma aleatoria, para proceder a una evaluación integral de todas ellas. La combinación de la instanciación numérica de las incógnitas con los términos independientes, de acuerdo al sistema de ecuaciones a resolver, da una posible solución que debe compararse con un parámetro de ajuste. El proceso se repite con otras instanciaciones numéricas hasta que se tenga una solución aceptable. La solución exacta exige un parámetro de ajuste igual a cero.



**Figura 28.** Flujo de información en el modelo genético - objetual para sistemas de ecuaciones no lineales.

Los conjuntos de miembros de las ecuaciones se pueden modelar en clases objetuales [Pastor, 95] [Brumbaugh, 94], cuya instanciación determina si se ha alcanzado una solución. Como se puede observar en la Figura 28, cuatro clases objetuales principales son suficientes: la clase individuo\_ecuación, la clase miembro\_ecuación, la clase individuo\_solución y la clase operador\_genético. La clase miembro\_ecuación tiene dos especializaciones, la clase incógnita y la clase función, que posee a su vez una especialización: clase argumento. La clase operador\_genético posee cuatro especializaciones: la clase reproducción, la clase cruzamiento, la clase mutación tradicional y la clase mutación especial (las cuales no se muestran en este diagrama), que actúan sobre cada individuo de la población creando la clase individuo\_solución, que en últimas es la base para encontrar la solución buscada. La clase Población es una agregación resultante de la clase individuo\_solución.

### 3.3.3.2 Modelo Genético

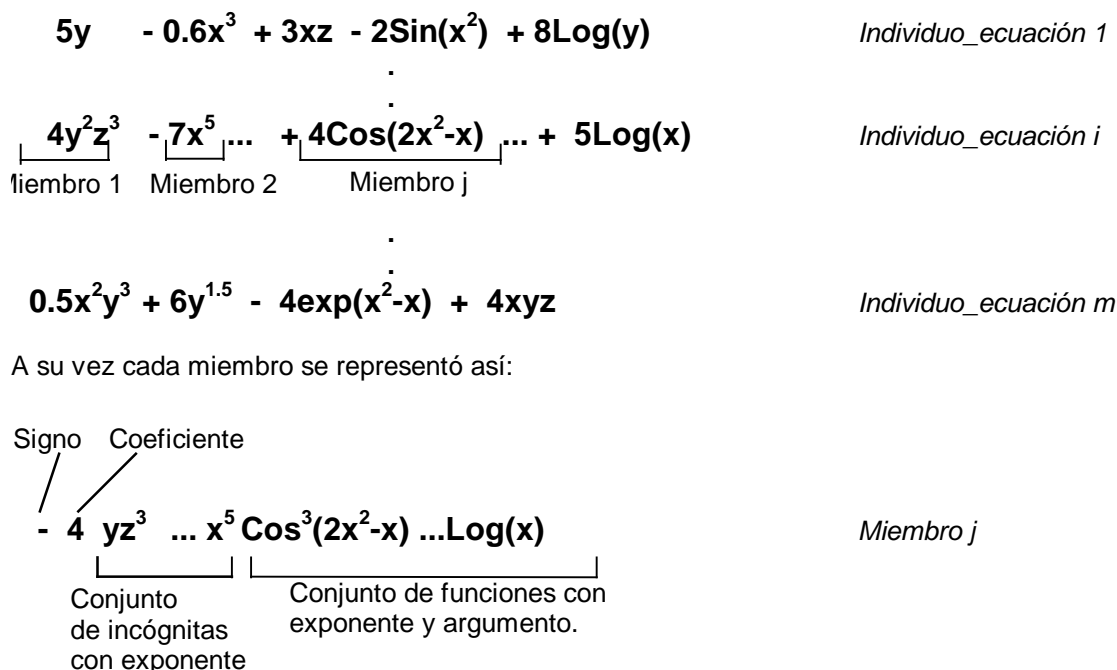
Como mencionamos en el Apartado 2.5, los Algoritmos Genéticos se basan en los mecanismos de selección que utiliza la naturaleza, según los cuales los individuos más aptos de una población son los que sobreviven al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno.

El conjunto de ecuaciones e incógnitas del sistema problema se modeló en las clases `individuo_ecuación` y `miembro_ecuación`, con una representación decimal, aprovechando las experiencias de Michalewicz y Golberg [Michalewicz, 1999], los cuales advierten sobre la diferencia entre la teoría y la práctica respecto al uso de lenguajes de codificación:

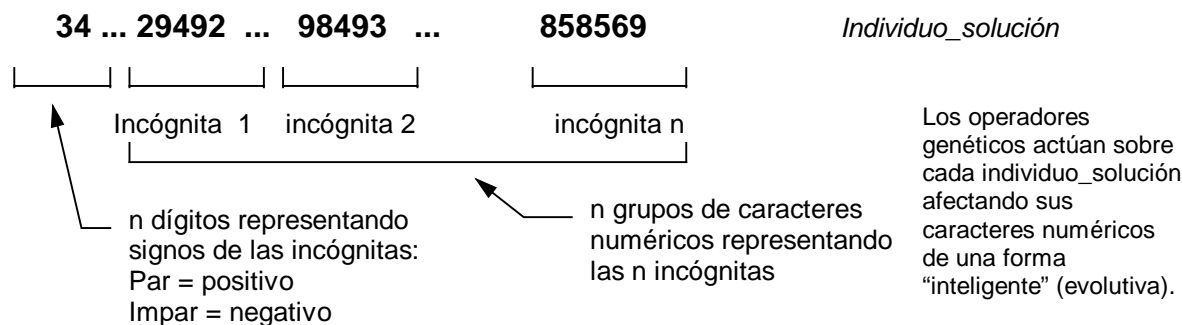
“Parece ser que el lenguaje binario, u otros de baja cardinalidad, por sus características serían los más óptimos para el mejoramiento del esquema representativo, pero esto ha sido contradicho por resultados empíricos de muchos trabajos, los cuales han usado alfabetos numéricos más extensos, como, un alfabeto representando números reales de punto flotante, que trabajan bien en una amplia variedad de problemas prácticos”.

La representación se muestra en la figura 29.

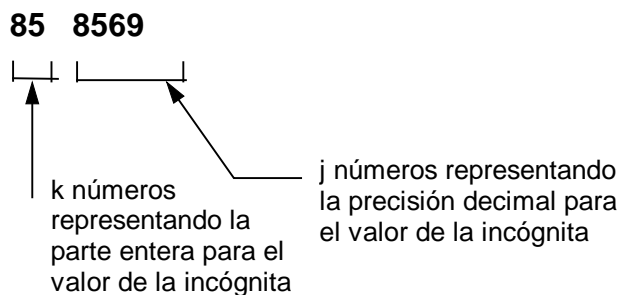
La población, modelada por técnicas evolutivas, es una asociación de `individuos_solución` en una generación determinada. El `individuo_solución` que es la pieza fundamental para codificar el algoritmo genético ya que almacena los valores de las incógnitas, se representó como se muestra en la figura 30 para un sistema de  $m$  ecuaciones y  $n$  incógnitas.



**Figura 29.** Ejemplo descriptivo del esquema objetual del conjunto de ecuaciones e incógnitas de un sistema NL problema.



A su vez cada grupo de caracteres numérico representando una incógnita esta compuesta por:



**Figura 30.** Esquema del individuo\_solución para un sistema de m ecuaciones y n incógnitas

### 3.3.3.3 Modelo Objetual

Se utilizó OO-METHOD y el lenguaje OASIS (Open and Active Specification Systems) como la metodología de especificación formal orientada a objetos para sistemas abiertos y activos. En OASIS, los objetos se definen como procesos observables y tienen un comportamiento cliente-servidor. Una clase en OASIS consiste de: un nombre de clase, una función de identificación para las instancias (objetos) de la clase, y un tipo o plantilla que todas las instancias comparten. Una descripción completa del lenguaje OASIS puede encontrarse en [Pastor 95]. Por la brevedad del espacio, la definición formal de la plantilla de clase no se presenta. La figura 31 muestra la plantilla sintáctica; las secciones de identificación y procesos son obligatorias, las otras opcionales.

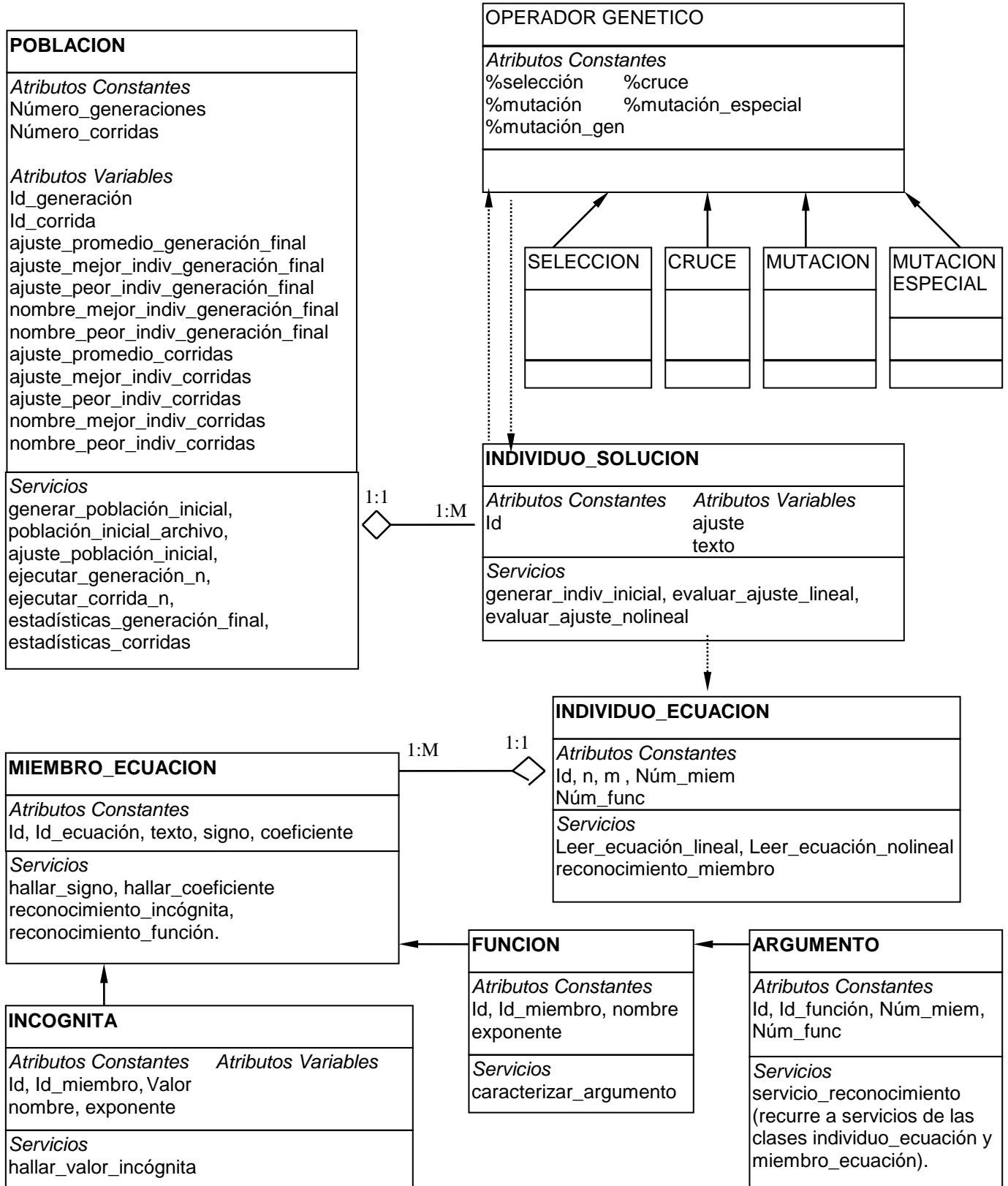
El modelo conceptual en OASIS se hace con tres vistas: Modelo de Objetos (diagrama de configuración de clases), Modelo Dinámico (diagrama de transición de estados y diagrama de interacción entre clases), y el Modelo Funcional (fórmulas en lógica dinámica). Debido a las limitaciones, sólo presentamos en la figura 32, el diagrama de interacción entre clases, complementado con los atributos constantes, atributos variables y servicios de clase.

```

Class(Class name)
  Identification
  Constant_attributes
  Variable_attributes
  Derived_attributes
  Private_events
  Shared_events
  Constraints
  Valuation
  Derivation
  Preconditions
  Triggers
  Transactions
  Processes
End_class

```

**Figura 31.** Plantilla de Clase en OASIS



**Figura 32.** Interacción de clases en el modelo para solucionar ecuaciones no lineales  
 (→ Asociación entre clases, → Interacción entre clases)



### 3.3.3.4 Función de Adaptación o Ajuste

Se calculó con la siguiente rutina:

<b>For j = 1 To m</b>	Recorre todas las ecuaciones
<b>h = 0, sx=0, sh=0</b>	
<b>For k = 1 to nmiembros</b>	Recorre todos los miembros de la ecuación j
<b>For p = 1 To n</b>	Recorre todas las incógnitas del miembro k
<b>sx=sx+X(p)<sup>exp(p)</sup></b>	Acumula producto de incógnitas
<b>Next</b>	
<b>For q = 1 to nfunciones</b>	Acumula producto de funciones
<b>sx=sx+sx*F(q)<sup>exp(q)</sup></b>	
<b>Next</b>	
<b>sh = sh + c(j, p) * X(p)</b>	Acumula el producto del vector coeficientes por el
<b>vector</b>	conjunto de incógnitas y funciones en cada miembro
	de la ecuación j.
<b>Next</b>	
<b>ajuste(i) = ajuste(i) + Abs(b(j) - sh)</b>	Calcula el ajuste de la ecuación i como la diferencia
	de la sumatoria de todos los miembros evaluados
	para una instancia de incógnitas y el término
	independiente.
<b>ajuste(individuo_solución x) = ajuste(individuo_solución x) + ajuste (i)</b>	
<b>Next</b>	

Al final se da una tabla ordenada por ajustes y mostrando sus respectivos individuos, la cual es la base para continuar con próximas generaciones. Como se puede inferir mientras más cercano a cero (0.01 fue el ajuste para terminar la mayoría de los problemas en este trabajo), mejor ajuste de la solución hallada.

### 3.3.3.5 Mutación Especial

El operador Mutación Especial se utiliza cuando se presenta una excesiva repetición de los mejores individuos: Intenta dar mayor variedad dentro de los mejores cromosomas compensando aquella no lograda por la función normal de mutación. Se muta el gen con una probabilidad de  $1/\text{longitud\_individuo}$  (Al menos 1 gen se muta en cada individuo repetido, aunque esta probabilidad puede variar). Se realiza después de que el individuo se ha sometido a todos los otros operadores genéticos. Se toma un porcentaje de la generación, ordenada por ajuste, y se compara cada cromosoma con los otros mutando los que estén repetidos.

### 3.3.3.6 Resultados de Prueba.

Se probó el modelo OOGM para múltiples casos en los cuales los más relevantes fueron:

- C1) El polinomio  $X^5 - X^4 - 13X^3 + 3X^2 + 36X - 36 = 0$ , el cual se puede demostrar que tiene 5 raíces reales. Las cinco raíces fueron halladas. Muchos métodos convergen a sólo una raíz.

Raíces reales exactas

1, 2, -2, 3, -3

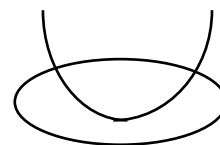
Raíces reales halladas por el modelo OOGM

1, 2, -2, 3, -3

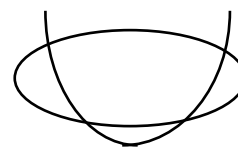
- C2) Elipses y parábolas interceptándose en uno, dos, tres, cuatro puntos, o sin intercepción. En todos los casos hallaba las soluciones (los puntos de intercepción si los había).

Dos puntos:  $2X^2 - 4X - Y - 3 = 0$   
 $X^2 - 2X + Y^2 - 4Y - 31 = 0$

Solución:  $X = -0.83, Y = 7.71$   $X = 2.83, Y = 7.71$

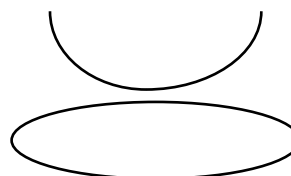


Cuatro puntos:  $2X^2 - 4X - Y - 3 = 0$   
 $X^2 - 2X + Y^2 - 30Y + 190 = 0$   
 Solución:  $X = -1.94, Y = 20.23$   $X = -0.91, Y = 9.31$   
 $X = 1.55, Y = 9.03$   $X = 2.65, Y = 20.77$



Sin intercepción  $2X^2 - 4X - Y - 3 = 0$   
 $Y^2 + 4X^2 - 4Y + 8X + 4 = 0$

Solución: El modelo OOGM no converge



- C3) El sistema de ecuaciones fuertemente no lineal:  $4\cos(2X) - X = Y$   
 $5\log_{10}(X) - X^3 + X^2 = Y$

El cual tiene dos soluciones reales de acuerdo a gráficas realizadas:

Soluciones reales exactas

No se pueden determinar por algunos métodos tradicionales.

Soluciones reales por el modelo OOGM

$X = 2.156, Y = -3.711$   
 $X = 0.751, Y = -0.479$

- C4) El sistema de ecuaciones no lineal (Correlación de Standing-Katz).

$$z = 1 + A\rho_{sr} + B\rho_{sr}^2 - C\rho_{sr}^5 + D(1 + E\rho_{sr}^2)(F\rho_{sr}^2)e^{-G\rho_{sr}^2}$$

$$\rho_{sr} = \frac{H}{z}$$

El cual se aplica en Ingeniería de Petróleos para hallar el factor de compresibilidad ( $z$ ) en base a una transformación de la densidad ( $\rho_{sr}$  - ninguno de los dos valores se conoce). En un proyecto de simulación numérica de un yacimiento con un fluido compresible, la solución de este sistema es crítico, debido a que en una sola iteración se debe hallar  $z$  en cada bloque y en cada tiempo, teniéndose que resolver el sistema miles o hasta millones de veces en una corrida. Los parámetros de A a H dependen de la temperatura y la presión del sistema y son los valores de entrada. Para el caso específico de la simulación realizada en esta investigación, el método de Newton-Rapson convergía muchas veces a valores negativos o inapropiados para el fenómeno físico descrito, haciendo parar el simulador o llevándolo a valores erróneos, en estos casos el modelo OOGM debió ser utilizado para hallar valores más confiables, a pesar de tomar más tiempo para converger.

Los valores óptimos en la prueba fueron: 5 corridas, 40 generaciones y 1000 individuos. El programa construido da las estadísticas para cada corrida y para un grupo de corridas. Cuando el sistema de ecuaciones tiene varias soluciones, se necesita, algunas veces, observar los resultados de cada corrida, porque es posible que se encuentren más soluciones en unas que en otras.

Cuando el ajuste era malo, y al aumentar el número de generaciones e/o individuos, no mejoraban las soluciones obtenidas, se llegaba a la conclusión que no existía una solución.

También es conveniente señalar que de acuerdo a Hageman y Young [Hageman 81], un método iterativo converge cuando el error entre la solución real y la hallada en una iteración  $k$ , disminuye cuando  $k$  aumenta, así, la función de aptitud asegura de una forma “natural” la convergencia si existen soluciones mejores, ya que los operadores genéticos harán mover las generaciones futuras hacia mejores individuos, o sea aquellos con una menor diferencia entre lo buscado y lo hallado. En el caso en que existan soluciones no factibles, Michalewicz [Michalewicz, 99] nos aconseja recurrir a la heurística:

“El proceso de selección de una función de evaluación podría llegar a ser demasiado complejo, especialmente cuando manejamos soluciones factibles y no factibles para el problema; varios métodos heurísticos usualmente son incorporados en este proceso”. Finalmente, pensando en la localidad o globalidad de las soluciones halladas, también por la naturaleza de su paralelismo implícito, los AG tienen la propiedad de moverse entre soluciones óptimas (óptimos locales) intentando llegar o acercarse lo máximo posible al

óptimo global (como lo muestran los resultados mostrados anteriormente), en este caso, métodos o estrategias heurísticas de oscilación y dispersión de los espacios de búsqueda pueden llegar a ser demasiado importantes”.

### 3.3.4 Modelo Evolutivo para la Solución de la Distribución de las Presiones a través del Modelo 3D para el yacimiento.

Inicialmente se realiza la discretización de la ecuación diferencial parcial a utilizar, posteriormente se discretizan las condiciones de frontera incluyendo la simulación del pozo como límite interno, y finalmente se muestra un resumen del programa utilizado para la simulación del yacimiento, junto con los resultados arrojados.

#### 3.3.4.1 Planteamiento de Ecuaciones numéricas para flujo de un fluido compresible en tres dimensiones.

En el caso del flujo de un fluido compresible en una estructura 3D, la ecuación resultante de combinar las ecuaciones de continuidad (masa), de estado (propiedades PVT) y la ley de Darcy (velocidad), es [Aziz, 1996] [Aziz, 1978] [Peaceman, 1977]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\mu z} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{P}{\mu z} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial w} \left( \frac{P}{\mu z} \frac{\partial P}{\partial w} \right) = \frac{\phi}{K} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P}{z} \right) \quad (36)$$

Discretizando numéricamente, cada término de la ecuación sería (de acuerdo al apartado 2.4):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\mu z} \frac{\partial P}{\partial x} \right)_{i,j,k,n+1} \cong \frac{\left( \frac{1}{\mu z} \right)_{i+1/2,j,k,n+1} \left( \frac{P_{i+1,j,k}^2 - P_{i,j,k}^2}{x_{i+1,j,k} - x_{i,j,k}} \right)_{n+1} - \left( \frac{1}{\mu z} \right)_{i-1/2,j,k,n+1} \left( \frac{P_{i,j,k}^2 - P_{i-1,j,k}^2}{x_{i,j,k} - x_{i-1,j,k}} \right)_{n+1}}{x_{i+1/2,j,k} - x_{i-1/2,j,k}} \quad (37a)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{P}{\mu z} \frac{\partial P}{\partial y} \right)_{i,j,k,n+1} \cong \frac{\left( \frac{1}{\mu z} \right)_{i,j+1/2,k,n+1} \left( \frac{P_{i,j+1,k}^2 - P_{i,j,k}^2}{y_{i,j+1,k} - y_{i,j,k}} \right)_{n+1} - \left( \frac{1}{\mu z} \right)_{i,j-1/2,k,n+1} \left( \frac{P_{i,j,k}^2 - P_{i,j-1,k}^2}{y_{i,j,k} - y_{i,j-1,k}} \right)_{n+1}}{y_{i,j+1/2,k} - y_{i,j-1/2,k}} \quad (38a)$$

$$\frac{\partial}{\partial w} \left( \frac{P}{\mu z} \frac{\partial P}{\partial w} \right)_{i,j,k,n+1} \cong \frac{\left( \frac{1}{\mu z} \right)_{i,j,k+1/2,n+1} \frac{P_{i,j,k+1}^2 - P_{i,j,k}^2}{w_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}} \Big|_{n+1} - \left( \frac{1}{\mu z} \right)_{i,j,k-1/2,n+1} \frac{P_{i,j,k}^2 - P_{i,j,k-1}^2}{w_{i,j,k} - w_{i,j,k-1}} \Big|_{n+1}}{w_{i,j,k+1/2} - w_{i,j,k-1/2}} \quad (39a)$$

$$\frac{\theta}{K} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P}{z} \right)_{i,j,k,n+1} \cong \frac{\theta}{K} \Big|_{i,j,k,n} \frac{\left( \frac{P}{z} \right)_{i,j,k,n+1} - \left( \frac{P}{z} \right)_{i,j,k,n}}{t_{n+1} - t_n} \quad (40a)$$

Si hacemos :

$$T)_{i,j,k,n} = \frac{K}{\theta \mu z} \Big|_{i,j,k,n} \quad (41)$$

Reemplazando la ecuación (41) en las cuatro anteriores, quedarían:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{KP}{\theta \mu z} \frac{\partial P}{\partial x} \right)_{i,j,k,n+1} \cong \frac{T)_{i+1/2,j,k,n+1} \frac{P_{i+1,j,k}^2 - P_{i,j,k}^2}{x_{i+1,j,k} - x_{i,j,k}} \Big|_{n+1} - T)_{i-1/2,j,k,n+1} \frac{P_{i,j,k}^2 - P_{i-1,j,k}^2}{x_{i,j,k} - x_{i-1,j,k}} \Big|_{n+1}}{x_{i+1/2,j,k} - x_{i-1/2,j,k}} \quad (37b)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{KP}{\theta \mu z} \frac{\partial P}{\partial y} \right)_{i,j,k,n+1} \cong \frac{T)_{i,j+1/2,k,n+1} \frac{P_{i,j+1,k}^2 - P_{i,j,k}^2}{y_{i,j+1,k} - y_{i,j,k}} \Big|_{n+1} - T)_{i,j-1/2,k,n+1} \frac{P_{i,j,k}^2 - P_{i,j-1,k}^2}{y_{i,j,k} - y_{i,j-1,k}} \Big|_{n+1}}{y_{i,j+1/2,k} - y_{i,j-1/2,k}} \quad (38b)$$

$$\frac{\partial}{\partial w} \left( \frac{KP}{\theta \mu z} \frac{\partial P}{\partial w} \right)_{i,j,k,n+1} \cong \frac{T)_{i,j,k+1/2,n+1} \frac{P_{i,j,k+1}^2 - P_{i,j,k}^2}{w_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}} \Big|_{n+1} - T)_{i,j,k-1/2,n+1} \frac{P_{i,j,k}^2 - P_{i,j,k-1}^2}{w_{i,j,k} - w_{i,j,k-1}} \Big|_{n+1}}{w_{i,j,k+1/2} - w_{i,j,k-1/2}} \quad (39b)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P}{z} \right)_{i,j,k,n+1} \cong \frac{\left( \frac{P}{z} \right)_{i,j,k,n+1} - \left( \frac{P}{z} \right)_{i,j,k,n}}{t_{n+1} - t_n} \quad (40b)$$

El sistema de ecuaciones de la (37b) a la (40b) está bajo un esquema implícito, así que es convergente.

Si denotamos las aproximaciones de las ecuaciones 37, 38 y 39, como A1, A2 y A3 respectivamente, la diferencia de tiempo como  $dt$ , y considerando el flujo que entra o sale del bloque por fuentes o sumideros ( $Q_{gi}$ ), la ecuación final sería (Aziz, 1995),:

$$\left( \frac{P}{z} \right)_{i,j,k,n+1} = 0.000264 dt_{n+1} (A1 + A2 + A3 + Q_{gi} B_{gi}) + \left( \frac{P}{z} \right)_{i,j,k,n} \quad (42)$$

Las propiedades físicas del gas en cada bloque se calcularon así [McCain, 1991] [kumar, 1987] [ERCB, 1979]:

$$z = 1 + A\rho_{sr} + B\rho_{sr}^2 - C\rho_{sr}^5 + D(1 + E\rho_{sr}^2)(F\rho_{sr}^2)e^{-G\rho_{sr}^2} \quad (43)$$

$$\rho_{sr} = \frac{H}{z} \quad (44)$$

Donde A, B, C, D, E, F, G y H son parámetros. Para el cálculo de estos parámetros se necesitan las propiedades pseudocríticas del gas, las cuales fueron calculadas con las ecuaciones:

$$P_{pc} = 756.8 - 131\gamma_g - 3.6\gamma_g^2 \quad (45)$$

$$T_{pc} = 169.2 + 349.5\gamma_g - 74\gamma_g^2 \quad (46)$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad (47) \quad T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (48)$$

Donde:  $P_{sc}$  : Presión seudocrítica del gas.  
 $P_{sr}$  : Presión seudoreducida del gas.  
 $T_{sc}$  : Temperatura seudocrítica del gas.  
 $T_{sr}$  : Presión seudoreducida del gas.  
 $\gamma$  : Gravedad específica del gas.

$$\rho_g = \frac{PM}{10.74zT} \quad (49)$$

$$B_1 = \frac{0.0001T^{1.5}(9.379 + 0.01607M)}{209.2 + 19.26M + T} \quad (50)$$

$$B_2 = 3.448 + (9.864 / T) + 0.01009M \quad (51)$$

$$B_3 = 2.447 - 0.2224B_2 \quad (52)$$

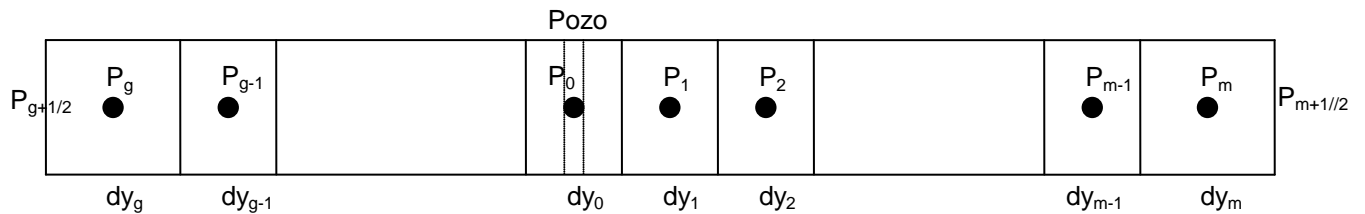
$$\mu_g = B_1 e^{(B_2(0.016033\rho_g)^{B_3})} \quad (53)$$

### 3.3.4.2 Condiciones de Frontera y Condición Inicial.

#### Límite Interno

Aplicando la ecuación de Darcy al esquema mostrado en la figura 33, para hallar la Presión  $P_{wf}$  en base al bloque del pozo ( $j=0$ ) en el tiempo  $n$  con presión  $P_o$  (valor medio de la presión en el bloque):

$$P_{wf})_n = P_{0,n} - \left( \frac{887.47Q_g B_g \mu_g}{2kA} \right)_{0,n} dy_j \quad (54)$$



**Figura 33.** Límite interno y externo en el modelo para el yacimiento.

Asumiendo flujo radial alrededor del pozo y definiendo  $r_o$  como la posición radial a la cual la presión del bloque calculada por el simulador es igual a la presión dada por la ecuación 54, podemos llegar a la siguiente relación (observar figura 34) [Aziz, 1995]:

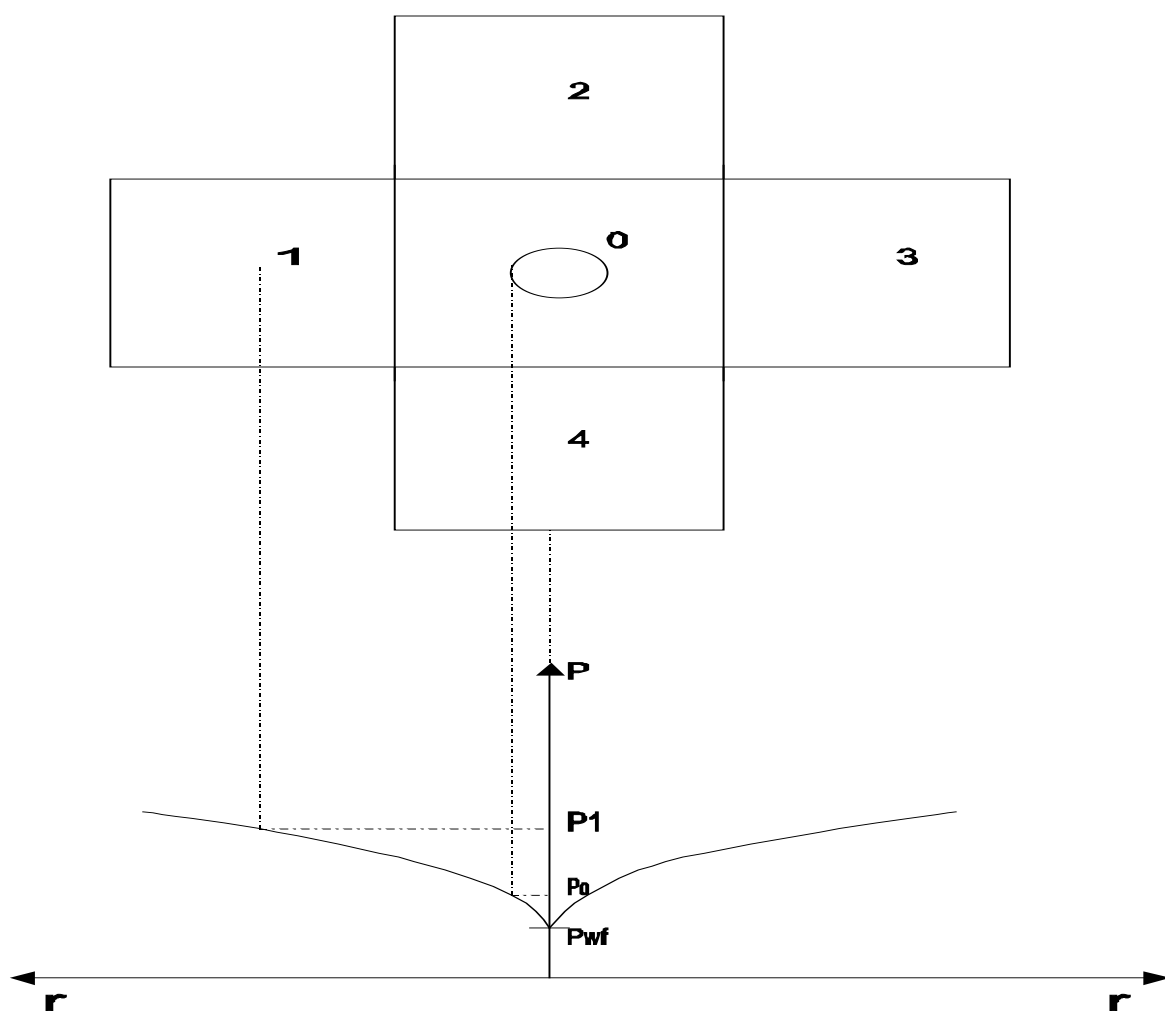
$$P_{wf})_n = P_{0,n} - \frac{887.47 Q_g B_g \mu_g}{2\pi kh} \left[ \ln\left(\frac{r_w}{r_o}\right) - s \right]_{0,n} \quad (55)$$

Donde :

- $r_w$  : Radio del fondo del pozo (pulg).
- $r_o$  : Radio equivalente en el fondo del pozo (pulg).
- $s$  : Daño de la formación alrededor del pozo (lpca).

Además  $r_o$  se puede calcular en un arreglo con bloques irregulares ( $dx \neq dy$ ) así:

$$r_o = 0.140365 \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} \quad (56)$$



**Figura 34.** Significado de la presión media ( $P_o$ ) y la presión de fondo ( $P_{wf}$ ) alrededor del pozo.

Una de las formas de solucionar la ecuación 42 es hacer la tasa  $Q_g$  constante, y esta a su vez es un acumulado de las tasas en cada estrato productor:



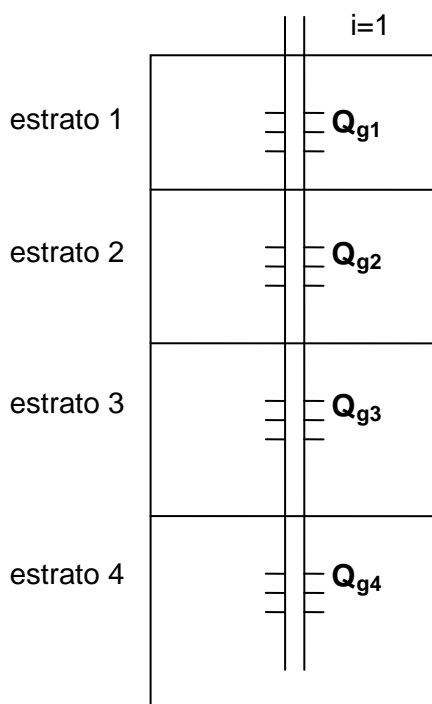
$$Q_g = \sum_{i=1}^{n\_est} Q_{gi} \quad (57)$$

Donde ***n\_est*** es el número de estratos o bloques productores en el fondo del pozo.  
(observar figura 35).

Luego se podría aproximar el valor de  $Q_{gi}$  así :

$$Q_{gi} = \left( \frac{4kh}{887.47 B_g \mu_g} \right)_i (P_0 - P_{wf})_{i,n} \left[ \frac{dx}{dy} + \frac{dy}{dx} \right]_i \quad (58)$$

$Q_g$  generalmente se da en Miles de pies cúbicos estándares por día, en estas ecuaciones aparece en barriles así que se debe hacer una conversión por un factor de 5.61458/1000.



**Figura 35.** Esquema de varios estratos productores.

### Límite Externo

La transmisibilidad se hace cero debido a que no hay flujo hacia el exterior del yacimiento quedando los otros términos de la ecuación 41 :

$$T)_{i,j,k,n} = 0 \quad (59)$$

### Condición Inicial

La condición inicial para la solución de la ecuación 42 se da cuando el yacimiento está en su forma natural sin haber producido, en este momento la presión en todos los bloques es igual a la presión inicial :

$$P)_{i,j,k,n=0} = P_{inicial} \quad (60)$$

#### 3.3.4.2 Modelo para la simulación evolutiva de la distribución de la caída de presión a través del yacimiento.

Ya sea la distribución de presión o la variación de esta (dp), tiene una forma exponencial con el mayor aumento de variación en los alrededores del pozo como se muestra de las tablas 4 a 6 y en las figuras 37 y 38.

El modelo desarrollado en esta investigación halla los parámetros, aleatoriamente generados, para una función heurística doblemente exponencial de la forma:  $e^{f(p) a_{exp}}$

Con f(p) una función de valores aleatorios:

$$f(p) = \text{factor\_dp} * a\_dpmax * \text{bloques\_base} * (1 - \text{fracción\_bloques}) \quad (61)$$

Donde (ver figura 36):

**Bloques\_base**= longitud máxima en bloques del pozo al bloque más distante. Si  $m > g$ , entonces  $\text{bloques\_base} = m + 1$ . Entre ellos se da la máxima caída de presión.

**fracción\_bloques**= distancia entre el bloque analizado y el bloque más lejano dividida por los  $\text{bloques\_base}$ , entonces  $\text{fracción\_bloques} = (m - j) / (m + 1)$

**factor\_dp**=  $\ln(dp\_max\_aleatorio) / \text{bloques\_base}$ . Halla un factor logarítmico de caída de presión máxima aleatoria entre el pozo y el bloque más lejano. Entre 0 y 1000 lpcá.

$a_{dpmax}$ =valor aleatorio entre 0 y 1 que cambia la forma de la curva de distribución logarítmica al multiplicarse por el factor\_dp.

Finalmente  $a_{exp}$ , es un valor aleatorio entre 1 y 1.5, que da mayor variación en las cercanías al pozo como se puede observar en las figuras 37 y 38 y tabla 5.

La razón del uso del valor aleatorio  $a_{dpmax}$  se puede observar comparando las tablas 4 y 5, en la tabla 4 se alcanza la variación de presión máxima en el bloque del pozo (99 lpca), mientras que en la tabla 5 para el mismo valor de  $a_{dpmax}$  hay una distribución de caída diferente alcanzándose un valor menor al máximo (21.05 lpca); o sea que  $a_{dpmax}$  permite mayor variabilidad en las distribuciones.

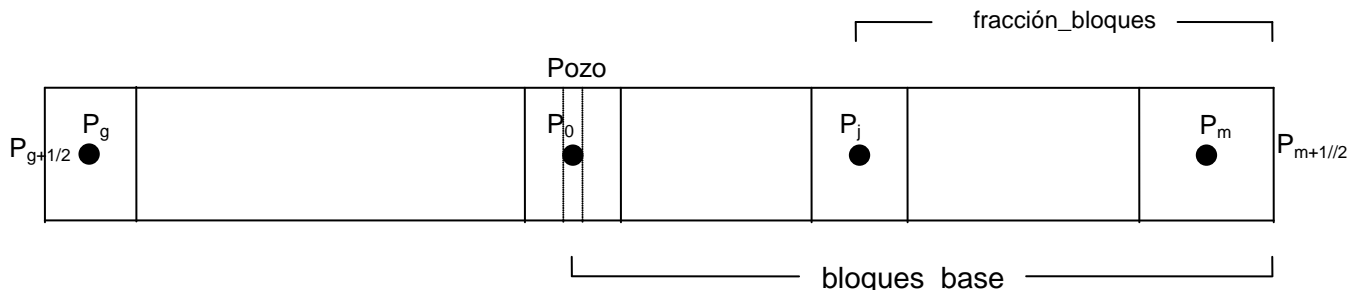
Finalmente la tabla 6 muestra un factor aleatorio para bloques a la presión inicial del yacimiento ( $dp_i = dp_j = 0$ ). Importante principalmente para tiempos cortos. Este nuevo valor aleatorio modifica el valor bloques\_base así:

$$bloques\_base = bloques\_base - bloques\_P_{inicial}$$

El valor  $dp_{ij}$ , es la sumatoria ponderada en base a la distancia al pozo de las caídas en dirección  $x$  y en dirección  $y$  (caso en 2D o 3D):

$$dp_{ij} = (dp_i * distancia\_pozo\_x + dp_j * distancia\_pozo\_y) / (distancia\_pozo\_x + distancia\_pozo\_y)$$

Como se muestra más adelante en el resumen del algoritmo utilizado, para cada tiempo  $n$ , se tiene un grupo de cromosomas cuyos genes son los valores aleatorios de la ecuación 61 más el aleatorio exponencial, estos valores permiten hallar la distribución de presión y la aptitud del individuo mediante el reemplazo de estas en la ecuación 42.



**Figura 36.** Modelo para distribuir la presión en base a la distancia del pozo.

**Tabla 4.** Distribución de la caída de presión sin valores aleatorios.

Distancia x (pies)	Distancia y (pies)	Caída de Presión (lpca)
--------------------	--------------------	-------------------------

Bloque	bloques_i	bloques_j	dp_i	dp_j	dp_ij
1	2200	133.33	16.58	1.52	2
2	4400	266.67	21.4	2.31	2.68
3	6600	400	27.62	3.5	3.58
4	8800	533.33	35.66	5.32	4.78
5	9350	666.67	46.03	8.07	6.75
6	9900	800	59.42	12.26	9.59
7	10450	933.33	76.69	18.62	13.72
8	<b>11000</b> (Bloque pozo i)	1066.67	99	28.27	19.76
9	11550	1200	76.69	42.93	28.12
10	12100	1333.33	59.42	65.19	40.96
11	12650	1466.67	46.03	99	60.28
12	14850	<b>1533.33</b> (Bloque pozo j)	35.66	65.19	35.68
13	17050	1600	27.62	42.93	20.93
14	19250	1733.33	21.4	28.27	12.15
15	21450	1866.67	16.58	18.62	6.95
16	23650	2000	12.84	12.26	3.89
17	25850		9.95		2.84
18	28050		7.71		1.73
19	30250		5.97		0.98
20	32450		4.63		0.48
21	34650		3.58		0.15
22	36850		2.78		0.29
23	39050		2.15		0.35
24	41250		1.67		0.37
25	43450		1.29		0.37
26	45650		1		0.35

a\_dpmax  
99

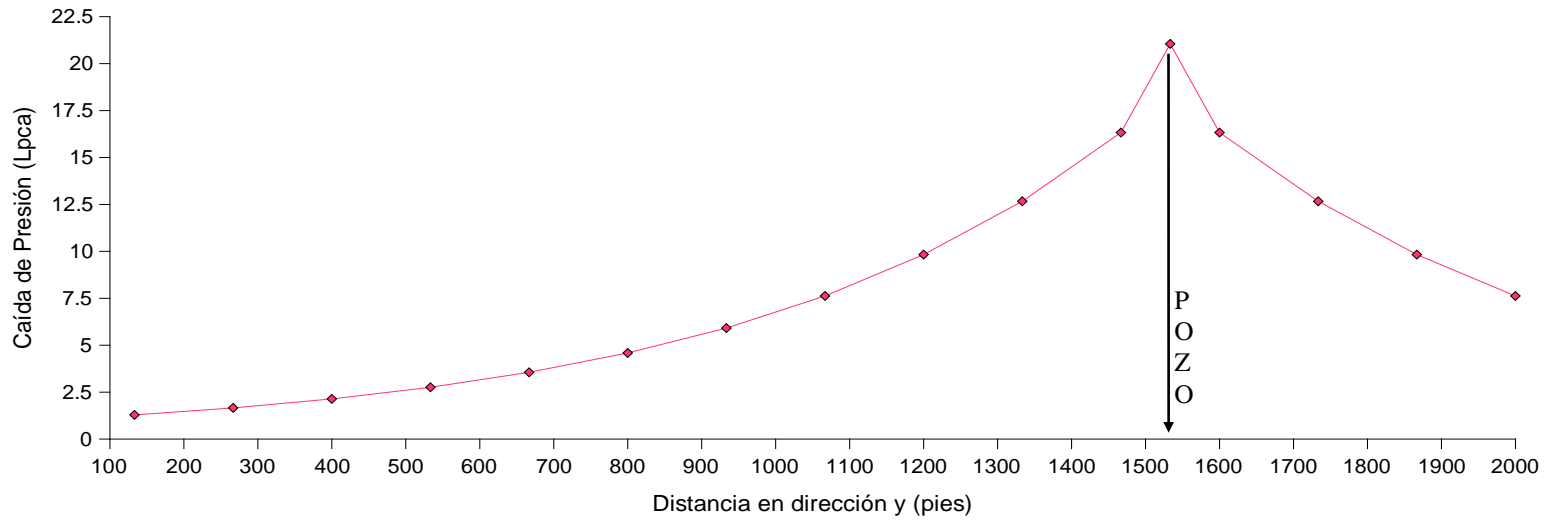
factor\_dpi  
0.26

factor\_dpj  
0.42

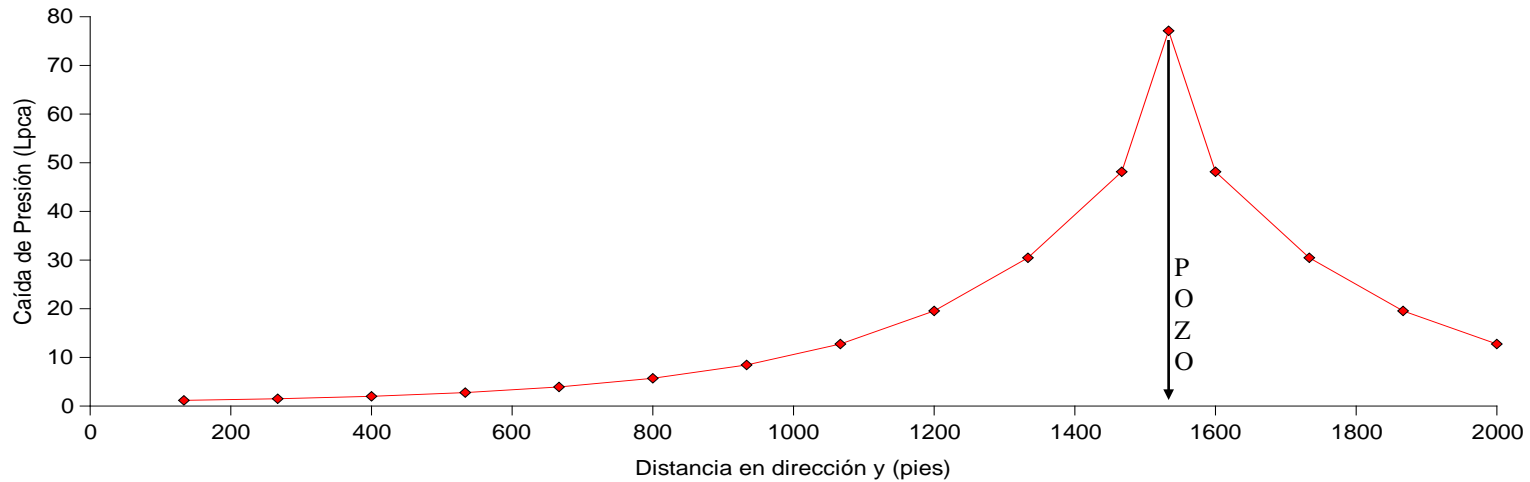
**Tabla 5.** Distribución de la caída de presión con valores aleatorios.

Bloque	Distancia x (pies)	Distancia y (pies)	Caída de Presión (Ipca)		
	bloques_i	bloques_j	dp_i	dp_j	dp_ij
1	2200	133.33	5.03	1.29	1.35
2	4400	266.67	5.75	1.66	1.59
3	6600	400	6.58	2.14	1.87
4	8800	533.33	7.53	2.76	2.18
5	9350	666.67	8.61	3.56	2.69
6	9900	800	9.85	4.59	3.34
7	10450	933.33	11.27	5.91	4.14
8	<b>11000</b> <b>(Bloque del pozo i)</b>	1066.67	12.9	7.62	5.15
9	11550	1200	11.27	9.83	6.38
10	12100	1333.33	9.85	12.67	7.95
11	12650	1466.67	8.61	16.33	9.94
12	14850	<b>1533.33</b> <b>(Bloque del pozo j)</b>	7.53	21.05	11.52
13	17050	1600	6.58	16.33	7.96
14	19250	1733.33	5.75	12.67	5.42
15	21450	1866.67	5.03	9.83	3.63
16	23650	2000	4.39	7.62	2.37
17	25850		3.84		0.16
18	28050		3.36		0.14
19	30250		2.93		0.12
20	32450		2.57		0.11
21	34650		2.24		0.1
22	36850		1.96		0.08
23	39050		1.71		0.07
24	41250		1.5		0.06
25	43450		1.31		0.06
26	45650		1.14		0.05

a\_dpmax      factor\_dpi      factor\_dpj      factor\_aleatorio  
99              0.26              0.48              0.53



**Figura 37.** Distribución de la caída de presión usando un esquema exponencial simple ( $a_{exp}=1$ )..



**Figura 38.** Distribución de la caída de presión usando un esquema exponencial doble ( $a_{exp}>1$ ).

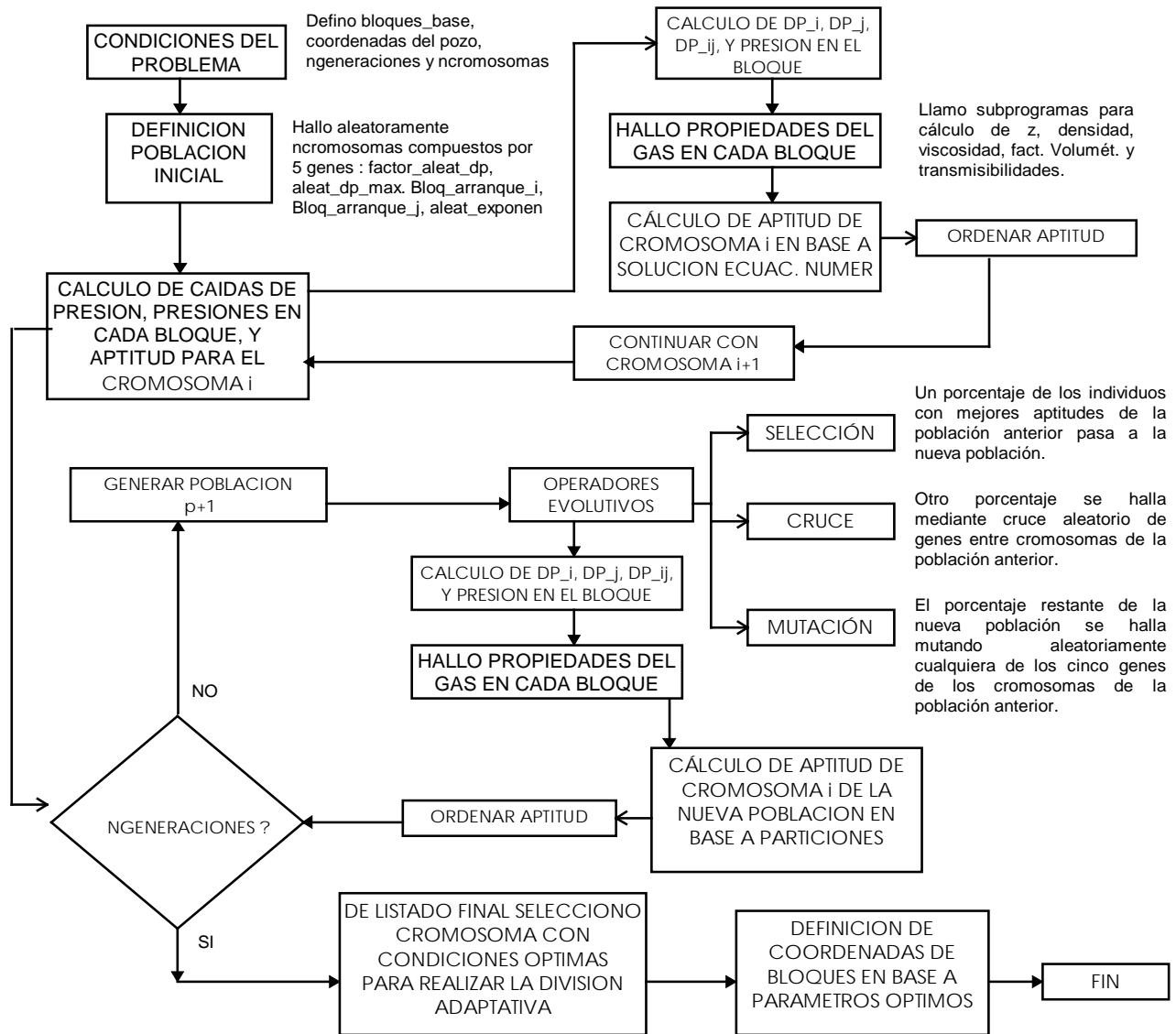
**Tabla 6.** Distribución de la caída de presión con valores aleatorios y bloques con presión igual a  $P_{inicial} \cdot (dp=0)$ .

Bloque	Distancia x (pies)	Distancia y (pies)	Caída de Presión (lpca)		
	bloques_i	bloques_j	dp_i	dp_j	dp_ij
1	2200	133.33	3.39	0	0.13
2	4400	266.67	3.95	0	0.14
3	6600	400	4.6	1.33	1.18
4	8800	533.33	5.36	1.78	1.42
5	9350	666.67	6.24	2.37	1.81
6	9900	800	7.27	3.16	2.31
7	10450	933.33	8.47	4.22	2.96
8	<b>11000</b> <b>(Bloque del pozo i)</b>	1066.67	9.87	5.63	3.81
9	11550	1200	8.47	7.51	4.87
10	12100	1333.33	7.27	10.01	6.28
11	12650	1466.67	6.24	13.35	8.13
12	14850	<b>1533.33</b> <b>(Bloque del pozo j)</b>	5.36	17.81	9.75
13	17050	1600	4.6	13.35	6.5
14	19250	1733.33	3.95	10.01	4.28
15	21450	1866.67	3.39	7.51	2.77
16	23650	2000	2.91	5.63	1.75
17	25850		2.5		0.11
18	28050		2.15		0.09
19	30250		1.84		0.08
20	32450		1.58		0.07
21	34650		1.36		0.06
22	36850		1.16		0.05
23	39050		1		0.04
24	41250		0		0
25	43450		0		0
26	45650		0		0

a\_dpmax      factor\_dpi      factor\_dpj      factor\_aleatorio  
99              0.26              0.48              0.6

Boques\_Pinicio\_i      Bloques\_Pinicio\_j  
3                              2

### 3.3.4.2 Diagrama de flujo de información para el distribuidor evolutivo de información.



**Figura 39.** Algoritmo General para el distribuidor de presión evolutivo.

El divisor utilizó 200 cromosomas y 50 generaciones (posteriormente se bajó a 20 generaciones por estudio de convergencia en apartado ?);

rata\_selección=20%, rata\_cruce=40% y rata\_mutación=40%.

Se mantuvo la política de decisión, del divisor espacial evolutivo para hallar las ratas en este algoritmo.

El cruce utilizó dos facetas :

20% mediante promedio de genes de dos individuos hallados aleatoriamente.



20% por intercambio de genes de dos individuos hallados aleatoriamente.

### **3.4 IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO GENÉTICO-OBJETUAL PARA LA SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN DEL POZO GÜEPAJÉ 1 DEL CAMPO GÜEPAJÉ-AYOMBÉ.**

Después de mostrar la conceptualización y formalización del modelo OOGM y alguna de sus aplicaciones parciales en los capítulos precedentes, pasamos a la etapa de explicar y mostrar la implementación del modelo y los resultados logrados para el yacimiento mencionado.

#### **3.4.1 Simulador con distribuidor de presiones evolutivo.**

Se construyó una aplicación que tiene como base el modelo de clases mostrado en el Anexo 11. Varias corridas del programa se realizaron en base a obtener la función de distribución de presiones a través del yacimiento para diferentes tiempos, dando para cada tiempo los respectivos parámetros de la función  $f(p)$  de la ecuación 61. La función de ajuste fue la sumatoria de los errores arrojados al reemplazar los valores arrojados por  $f(p)$  (presiones en tiempo  $n+1$ ) en la ecuación 42. En los Anexos 12 y 13 se muestran los resultados para este simulador. Aquellos del Anexo 12, sirvieron para calibrar el simulador, ya que en esta corrida no había tasa de producción y el simulador debía devolver las presiones iniciales a través del yacimiento. Los del Anexo 13, si consideran tasa de producción, la cual fue hallada como un promedio de los resultados del Anexo 5 para la producción del pozo Güepajé 1; así mismo muchas de las otras propiedades también se promediaron con los datos disponibles para el yacimiento (Anexo 7), como la permeabilidad. Más adelante hacemos un análisis de la implicaciones de estos promedios y futuras mejoras que se pudieran introducir en el simulador. Algunas de las características más importantes del programa simulador fueron:

**Orden de procesos del programa**

1. Leer y dibujar puntos frontera para planos xy y xz
2. Dividir el plano xy y xz con intervalos espaciales iniciales
3. Agregar y quitar bloques para ajustar los planos xy y xz en los bordes antes de la división evolutiva.
4. Realizar división 3D evolutiva: Buscar mejores parámetros de partición; realizar partición evolutiva en ambos planos;
5. Consultar tabla de resultados de parámetros de partición para inspeccionar y seleccionar el mejor cromosoma o combinación de parámetros para el usuario.
6. Definir coordenadas de los bloques en xy y xz con los parámetros de partición.
7. Volver a agregar y quitar bloques para ajustar los planos xy y xz en los bordes después de la división evolutiva.
8. Realizar división 3D.
9. Consultar archivo de bloques posiblemente problemáticos (hacen denominador 0 en ecuaciones numéricas).
10. Leer propiedades iniciales del yacimiento.
11. Cálculo de propiedades iniciales del yacimiento.
12. Para  $t=t_{inicial}$  distribuir presiones a través del yacimiento utilizando el distribuidor evolutivo de presión. (figura 39). Con ecuación 42 hallar el error (aptitud) de cada distribución (cromosoma) al reemplazar en esta las presiones halladas.
13. Repetir paso anterior para tiempos posteriores hasta  $t_{final}$ .

### **Orden en los subprogramas de la aplicación general**

```

Mnu_leer_puntos_xy_Click
yac.dibujar_puntos_xy
yac.dividir_plano_xy
yac.agregar_bloques_xy
Mnu_leer_puntos_xz_Click
yac.dibujar_puntos_xz
yac.dividir_plano_xz
yac.agregar_bloques_xz
yac.Quitar_bloques_xz
Mnu_leer_propiedades_de_pozos_y_estratos_Click
yac.realice_def_secciones = True
yac.división_adaptativa
yac.división_adaptativa
yac.hubo_división_adaptativa = True
yac.quitar_bloques_xy
yac.agregar_bloques_xy
yac.Quitar_bloques_xz
yac.agregar_bloques_xz
yac.división_3D
yac.leer_propiedades_iniciales
Mnu_leer_propiedades_de_yacimiento.Enabled = False
mnu_solución_distribución_de_presión.Enabled = True
yac.cálculo_propiedades_iniciales
yac.solución_distribución_de_presión

```

#### **3.4.2 Simulador implícito típico.**

Se construyó otro simulador implícito, estándar en la simulación de yacimientos, aunque este tomó las ventajas de los módulos evolutivos para la partición espacial y la solución de las ecuaciones NL en los bloques. Básicamente es igual al anterior, pero sin el objeto distribuidor de presiones evolutivo explicado. Este simulador partía de una distribución inicial de presiones iguales a la presión inicial del yacimiento, posteriormente hallaba las presiones en el tiempo  $n+1$  despejando este valor de la ecuación 42, y calculaba el error de esta ecuación. Posteriormente hacía las presiones en  $n$  iguales a las de  $n+1$  y repetía el proceso hasta su convergencia y para otros tiempos.

En el capítulo siguiente se analizan los resultados para cada uno de los dos simuladores.

### **3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

En los siguientes párrafos se analizan y comparan entre sí y con datos reales, los resultados de los dos simuladores implementados. En los anexos 12, 13 y 14 se muestran los resultados correspondientes a condiciones iniciales del yacimiento, tiempos posteriores al inicial, parámetros de la ecuación de distribución de presión y presiones del pozo para diferentes arenas.

#### **3.5.1 Simulador con Distribución de Presión Evolutivo**

##### **3.5.1.1 Error del simulador**

Para los resultados obtenidos en la calibración del simulador evolutivo mostrados en el Anexo 12, en la cual, como se mencionó anteriormente, se evalúa en qué porcentaje se desvían las presiones del simulador de los datos reales ( $P_{inicial}=5712$  lpca). En esta medición el mejor cromosoma presentó un ajuste de 2.8742 lpca, lo que da para 200 bloques un error promedio por bloque de 0.01437 lpca, en otras palabras las presiones se desviaron en este valor, en promedio, de la presión inicial. Este error promedio se mantuvo a través de todas las corridas. Este error se mantiene aunque las generaciones y cromosomas del algoritmo genético se aumenten, lo que muestra la rápida convergencia del método.

Para un  $dt=720$  horas (1 mes) el error estuvo aproximado al promedio anterior (entre 2.7 y 2.9 lpca para todas las presiones), pero al aumentar el  $dt$  al doble (1440 horas, 2 meses), el error se duplicó también aproximadamente (5.71 total, 0.0285 lpca en promedio por bloque) como se puede observar en las aptitudes mostradas en el anexo 13. Debido a lo anterior se puede pensar que este error, es un error inicial y propio del modelo, como se discutió en el apartado 2.4.3.6.

Como el simulador evolutivo es un simulador implícito se puede aumentar el intervalo de tiempo ( $dt$ ) sin temer a que se torne inestable.

En casi todas las corridas se trabajó con este último valor (1440 horas).

##### **3.5.1.2 Convergencia del simulador**

Por los resultados de las dos primeras tablas en el anexo 13, podemos observar que entre la generación 10 y 15 los valores de aptitud de los cromosomas empiezan a mantenerse dentro de un mismo promedio aproximado al mencionado en el anterior apartado. Por ello se decidió después de haber realizado las primeras corridas con 50 generaciones y 200 cromosomas, trabajar con 20 generaciones y 100 cromosomas para lograr un menor tiempo de corrida. También se puede observar que en la generación siguiente la aptitud de uno de los mejores cromosomas puede desmejorar un poco, esto posiblemente se explica por la cantidad de operaciones, dependencias entre las presiones y relaciones involucradas, que hacen que en la excesiva cantidad de cálculos los valores de presión y propiedades para los bloques puedan salir afectadas al momento de calcular la aptitud del cromosoma. Sin embargo la aptitud promedio de los mejores cromosomas aumenta hasta cierta generación (entre 10 y 15 como se discutió anteriormente) mantiniéndose luego estable.

### **3.5.1.3 Distribución de Presiones para $t > t_{inicial}$**

En el anexo 13, se muestra la tabla que da las presiones bloque a bloque para los 200 bloques resultantes de la discretización, como se puede observar en los bloques cercanos a la región del pozo ( $i=5$  y  $j=5$ ), las caídas aumentan drásticamente en dirección horizontal, mientras que en regiones alejadas del pozo, los cambios permanecen bajos en esta misma dirección y las presiones permanecen cercanas a la presión inicial. La variación de presión en dirección vertical no se da (por ejemplo los bloques 5,5,1 y 5,5,2 tienen la misma presión), porque no se simulaban efectos gravitacionales ni de columna hidrostática en el fondo del pozo.

### **3.5.1.4 Parámetros de la ecuación de distribución para $t > t_{inicial}$**

Se puede observar en el anexo 13, cierta convergencia hacia valores estables del factor de caída de presión y de los bloques a la presión inicial en direcciones  $i$  y  $j$ , sobre todo, se observó que esto es más cierto para estos dos últimos parámetros, a grandes tiempos, igual que para el factor de caída de presión máxima. Para los otros parámetros no se nota una estabilización en un valor puntual.

### **3.5.2 Simulador con distribución de presión estándar (Simulador típico)**

#### **3.5.2.1 Error y convergencia del simulador**

Como se puede observar en el anexo 14, los errores para todas las iteraciones se mantienen en el orden de  $10^{-7}$ , esto se explica por la distribución uniforme, con presiones iguales tanto en dirección horizontal como vertical, en regiones del yacimiento muy extensas, como se observa en la tabla de distribución de presiones en los bloques de este mismo anexo. Como en la ecuación 41, los términos A1, A2 y A3 dependen de diferenciales de presión, y como las presiones circundantes son iguales, se esperará que estos diferenciales sean cero disminuyendo drásticamente los valores de error de esta ecuación. Se varió la presión de iteración de arranque para n+1, haciéndola un poco menor a la inicial, pero los resultados fueron los mismos. Una mayor investigación sobre la causa de este fenómeno en simuladores típicos debe realizarse. Estos valores bajos se conservan desde las primeras iteraciones hasta las finales, incluso para cuando aumenta el tiempo.

#### **3.5.2.2 Distribución de Presiones para $t > t_{inicial}$**

Como se discutió ya en el apartado anterior, el anexo 14 muestra una distribución de presión que presenta ciertas irregularidades respecto al fenómeno que representa, por ejemplo, se espera que la presión disminuya en base a una función no lineal (generalmente logarítmica) a medida que se avanza horizontalmente hacia el pozo, pero por la distribución mostrada muchos bloques tienen la misma presión y sólo se pasa drásticamente, después de un límite definido de bloques, a una presión inferior. También se observa que en los bloques del pozo por debajo del primero las presiones son casi iguales a la inicial: 5666 para el bloque (5,5,1) y 5711 para el bloque inmediatamente inferior (5,5,2), lo cual es un error de distribución bastante apreciable, ya que en todos los bloques del pozo debe haber una presión parecida, y para un tiempo tan apreciable (48 meses), la presión debe haber descendido en una cantidad apreciable.

### **3.5.3 Comparación de resultados entre ambos simuladores y datos reales.**

De la discusión en los apartados anteriores observamos que la distribución evolutiva de presiones hallada con base al modelo OOGM aquí propuesto, aunque pueda ser mejorada con la consideración de efectos que produzcan variaciones de propiedades en dirección vertical, refleja mucho mejor el cambio de presiones en un plano horizontal que el simulador típico desarrollado. También en sentido vertical mantiene la presión en un valor estable mientras que

el simulador típico la varía drásticamente por debajo de los primeros bloques hacia la presión inicial.

En general el simulador estándar producía resultados para todos los tiempos en cuestión de segundos, mientras que el evolutivo tomaba hasta algunas horas en arrojar resultados; esto es debido al hecho que el evolutivo debía realizar muchos más cálculos entre generación y generación y entre cromosoma y cromosoma, sin embargo, los resultados obtenidos con el simulador evolutivo superan los obtenidos por el simulador típico, de acuerdo a los valores que representan las presiones, lo cual justifica el tiempo invertido en cómputo. Podría hacerse más estudios acerca de la calidad de los resultados arrojados por los simuladores típicos, en este caso la evaluación muestra que sus resultados pueden estar lejos de la realidad, y convergen a valores cuyas razones de procedencia necesitan ser más analizadas.

La presión calculada por el simulador evolutivo tiende a ser más baja que la calculada por el simulador típico, mostrándose una diferencia notoria de más de 100 lpc para 48 meses. Por los resultados medidos en campo para la presión en el fondo analizada más adelante y por el tipo de modelo realizado, basado en funciones de distribución para cada tiempo, consideramos que los valores para el simulador evolutivo son correctos.

De los datos de los anexos 5 y 6, podemos observar que el pozo Güepajé 1, fue el primero en iniciar producción y lo hizo a mediados de mayo de 1992, este pozo produjo solitariamente hasta diciembre de 1995 cuando se abrió a producción el pozo Güepajé 2, así que este período de casi cuatro años nos sirve de referencia para comparar las presiones de fondo medidas con instrumentos de campo con las halladas por el simulador evolutivo. Comparando las presiones de fondo del anexo 6 y anexo 13 (presiones en las diferentes arenas o estratos), observamos que para las arenas U7, U5 y U4 hay cierta consistencia en sus valores con la presión medida en Junio de 1995, sin embargo la arena U6, está bastante elevada, lo cual pudiera ser índice de un error ya sea en la estimación de una de sus propiedades o el valor medido de presión en el fondo del pozo. También existe cierto margen de error con las ecuaciones utilizadas: ecuación 58 para las tasas de producción en cada estrato y ecuación 55 para hallar la presión de fondo en cada estrato después de tener la tasa volumétrica de producción en la misma. Adicionalmente, los datos reales suministrados para la presión de fondo son escasos para fines de comparación, algunos valores para la producción del pozo Güepajé 2 pueden no haber sido suministrados, y adicionalmente, el tiempo de las presiones del simulador evolutivo son casi un año posteriores al tiempo en que se midieron las reales. Un estudio más minucioso con más

datos reales y con análisis de diferentes modelos o ecuaciones para la presión de fondo quedarían pendientes para mejorar la validación del modelo. Sin embargo, consideramos que la aproximación inicial es válida para la mayoría de las arenas.



#### 4. CONCLUSIONES.

Ante el surgimiento en la simulación y el modelamiento de problemas altamente complejos en sistemas naturales, que envuelven muchas disciplinas igualmente desarrolladas y complejas, emergen las nuevas técnicas de representación, ordenación, análisis y búsqueda computacionales, que brindan como principales ventajas su posibilidad de actuar sobre vastos espacios, gran velocidad de respuesta y flexibilidad en la modelación, cualidades importantes en el momento de intentar encontrar posibles explicaciones al caótico mundo de los sistemas abiertos dinámicos o sistemas complejos. Los problemas planteados en el estudio del cambio de las formas del relieve, la evolución de las especies, la historia sociológica de antiguas culturas, movimiento de fluidos, las relaciones ecológicas, simulaciones hidrológicas, climáticas, económicas, etc.; están llegando a entenderse mejor desde perspectivas más simples, generalmente con la hibridación de las nuevas tecnologías informáticas. En este proyecto de investigación, el paradigma de la Computación Evolutiva se conjuga con el paradigma de la Orientación por Objetos, para generar un nuevo método de modelamiento, que hemos llamado Modelo Genético Objetual (OOGM - Oriented Object Genetic Model), que sirve para representar, solucionar y comprender el comportamiento de sistemas complejos.

El Modelo Evolutivo Orientado a Objetos sirvió para representar de una forma natural, real, fácil y entendible, el comportamiento y la distribución de presiones a través del yacimiento de gas GÜEPAJÉ-AYOMBE, también permitió una discretización más óptima de este y la solución de conflictos con el cálculo de algunas propiedades inconsistentes, como el factor de compresibilidad del gas. Para el problema de la distribución de presiones se desarrolló un distribuidor evolutivo de presión, para el caso de la discretización del yacimiento, un divisor espacial evolutivo, y para la solución de ecuaciones no lineales de propiedades en bloques, un optimizador evolutivo de sistemas no lineales. Cada uno de ellos fue probado exitosamente en su respectiva área y gracias a su integración se logró simular todo el yacimiento de gas.

El modelo desarrollado puede fácilmente extenderse para representar no sólo la distribución no lineal de la presión, sino también otras propiedades como la temperatura, viscosidad,

permeabilidad, etc., con base a otras funciones de distribución, ya que al discretizar espacialmente y distribuir las presiones basándose en el cambio de una función logarítmica o exponencial de presión (depende del sentido en que se haga), otras propiedades podrían ser toscamente distribuidas.

El nuevo modelo pudiera servir para evaluar los modelos tradicionales u otros emergentes, así como los efectos de considerar o no la variabilidad de las propiedades litológicas (permeabilidad y porosidad) a través del yacimiento.

Ante la necesidad del país de desarrollar nuevas tecnologías enfocadas a la búsqueda y eficiente explotación y utilización de recursos naturales menos contaminantes como el gas natural, este estudio sirve como una base para avanzar en este sentido.

## 5. RECOMENDACIONES

Implementar el modelo con casos más complejos donde se presente flujo multifásico, variaciones de contacto entre fases (cambio del contacto agua-gas o agua-petróleo), efectos composicionales, etc.

Extender las posibilidades del modelo, inicialmente, mediante el uso de la programación genética debido a la posibilidad de esta herramienta de incluir más símbolos como operadores matemáticos, funciones, en las ecuaciones que representan la distribución de presión y otras propiedades a través del yacimiento.

Para una más completa validación del modelo, y análisis de la exactitud de sus resultados, debe continuarse este estudio con otros yacimientos de los cuales se disponga de más datos de producción y presión reales que puedan ser contrastada con los resultados del simulador. Además con yacimientos que presenten sectores de heterogeneidad, múltiples pozos, flujo multifásico. También incluir y observar la posibilidades de otras herramientas de la computación evolutiva : programación genética, estrategias de evolución etc., en el área de la Simulación de Yacimientos, ya que en esta investigación sólo se hizo con algoritmos genéticos.

Simular yacimientos donde se cuente con gran cantidad de información y que hallan sido suficientemente estudiados por otras técnicas, para contrastar y validar el modelo más intensivamente.

Integrar al modelo otros paradigmas actuales, como : la realidad virtual, que puede incluir una mejor visualización de la variación espacio temporal de propiedades ; la computación neuronal, para representar la distribución y variación espacial y temporal de la permeabilidad relativa a una de las fases, cambios en la porosidad, en el daño de la formación, etc. ; y otras técnicas de refinación de malla (grid refinement), para desarrollar el proceso de discretización más apropiadamente.

## GLOSARIO

**Acuífero:** Es un reservorio de agua en contacto con otro que contiene petróleo y/o gas. Generalmente el acuífero sirve como mecanismo de expulsión del petróleo por su expansión o porque se alimenta constantemente de otras fuentes de agua.

**Ajuste de un modelo:** Proceso de comparar y adecuar un modelo de acuerdo a sus resultados, relaciones con otros modelos, comparación con datos históricos reales, mediante análisis estadísticos, mediante consecución de nueva información, o nuevas suposiciones, con el fin de mejorar su desempeño y capacidad de predicción. Generalmente, mientras más alejados estén los resultados predichos por el simulador del comportamiento real, mayor necesidad habrá de incorporar mayores cambios, adaptaciones al simulador, los cuales se traducen generalmente en más tecnología de punta y por ende en mayor complejidad.

**Anisotropía:** Medio poroso heterogéneo en el cual varían sus propiedades (permeabilidad y porosidad) con la distancia.

**Campo:** Espacio físico de actividades en un lugar de explotación de petróleo o gas.

**Capilaridad:** Propiedad de un líquido o gas de adherirse a un sólido creando tensiones o fuerzas que alteran los valores normales de estas en un sistema natural.

### Clasificación de Yacimientos por el tipo de fluido que contiene:

Tipo de Petróleo	GOR (Gas Oil Relation - pie <sup>3</sup> /bbl)
<i>Petróleo Negro o Volátil (Black Oil o Volatile Oil).</i> Petróleos con baja cantidad de gas.	< 2000
Gas Condensado	>3300
Gases Húmedos (Wet Gases)	≥ 50000
Gases Secos (Dry Gases)	Puro gas. No liberan líquidos.

**Comportamiento Finito:** Estado en el cual, la perturbación de presión ya ha tocado los extremos del yacimiento.

**Comportamiento Infinito:** Estado en el cual, la perturbación de presión que viaja en el yacimiento, actúa como si este fuera infinito, sin llegar aún a los límites de este.

**Condición Inicial:** Ecuación que establece el valor de una o más variables antes de iniciar un proceso de simulación.

**Condición de Frontera:** Ecuación que establece el valor de una o más variables en el límite del espacio físico problema.

**Conificación:** Fenómeno problemático del pozo que consiste en la invasión de la pared del pozo o zona cercana al pozo por una fase, la cual fluye a tasas altas, impidiendo que las otras fases puedan salir o fluir hacia al pozo a velocidades normales.

**Consistencia de un Modelo Numérico:** Se da si el error tiende a cero cuando los intervalos de espacio y tiempo tienden a cero.

**Daño del Pozo:** Anormalidad en las regiones del yacimiento cercanas al pozo producida por acción severa de productos químicos utilizados durante la perforación o en trabajos de acondicionamiento del pozo, y/o taponamiento con finos (partículas sólidas pequeñas) suspendidos en el fluido en movimiento. Este daño generalmente, disminuye la tasa de producción y aumenta la caída de presión en esta región, hecho que perjudica grandemente la utilización óptima de la presión natural del yacimiento para efectos de producción.

**Determinístico:** Sistema opuesto al estocástico. Todas las variables presentes tienen valores conocidos y no se requieren variables aleatorias. Sólo hay una salida para un conjunto de entradas.

**Discretización:** Proceso por el cual se subdivide el espacio y el tiempo en un sistema determinado, con el objetivo de resolver las ecuaciones numéricas planteadas para dicho sistema ; o, es el proceso de obtener las ecuaciones en diferencias finitas o en otros operadores usados por las técnicas numéricas, que aproximen las ecuaciones analíticas a resolver.

**Error de un Modelo Numérico:** Es el error generado por dos errores: error de redondeo o truncamiento del computador utilizado para solucionar el modelo y el error de discretización del modelo, el cual está relacionado con el error inicial, y es debido a las condiciones iniciales del modelo.

**Estabilidad de un Modelo Numérico:** Es la capacidad de un modelo numérico de converger a soluciones aproximadas dentro de un intervalo de tolerancia, está determinada por el valor del error que se comete en cada iteración; si este es grande y/o aumenta con el tiempo, el modelo arrojará pobres o inútiles resultados y se dice que el modelo es inestable.

**Estocástica:** Sistema que presenta un comportamiento aleatorio. Este comportamiento se explica por las variables de entrada, con una distribución de probabilidad diferente para cada una. Las salidas son también variables aleatorias basadas en las características verdaderas del sistema, y son manejadas estadísticamente.

**Falla:** Fractura o barrera natural que separa o divide una misma estructura geológica, provocada por fisura o quiebre de esta estructura.

**Fluido:** Cuerpo que toma la forma del recipiente o medio que lo contiene. Sustancia o mezcla de sustancias que se deforma ante una fuerza cortante mínima.

**Flujo Multifásico:** Flujo simultáneo de varias sustancias o componentes de un fluido (fases) en un medio físico, por ejemplo el flujo de agua y petróleo.

**Flujo Transiente:** Flujo caótico en el cual no hay estabilización, la presión es cambiante bruscamente tanto respecto al tiempo como a la posición.

**Isotropía:** Medio poroso uniforme en el cual no varían sus propiedades físicas (permeabilidad y porosidad) con la distancia.

**Lenguaje de Simulación:** Lenguaje versátil todo propósito que puede ser usado para muchos tipos de aplicaciones. Aunque son comparables con lenguajes de alto nivel como el Basic, C o Fortran; tienen posibilidades adicionales como análisis estadístico y otras características

propias de la Simulación. Ejemplos de estos lenguajes son: GPSS (General Purpose Simulation System), POWERSIM, SLAM (Simulation Language for Alternative Modeling), SIMAN (Simulation Analysis Program).

**Medio Poroso:** Cuerpo, generalmente una roca, provisto de poros que pueden permitir la contención y flujo de un fluido.

**Modelo Dinámico:** Modelo que cambia con el tiempo simulado.

**Modelo:** Representación de un sistema para entender su comportamiento.

**Presión Terminal Constante:** Método de producción y de solución de las ecuaciones de un yacimiento, en el cual se deja constante la presión en el fondo del pozo del yacimiento.

**Propiedades PVT de un Yacimiento:** Curvas o mediciones de las relaciones entre Presión, Volumen y Temperatura del yacimiento.

**Rata Terminal Constante:** Método de producción y de solución de las ecuaciones de un yacimiento, en el cual se deja constante la tasa de producción del yacimiento.

**Recobro Final:** Volumen total de petróleo o/y gas que se logró o logrará recuperar de un yacimiento: generalmente 30 - 40 % por flujo natural, 30 - 50% por métodos artificiales de recuperación o extracción.

**Recuperación Avanzada o mejorada del petróleo (EOR):** Procesos de recobro final de petróleo de un yacimiento, utilizados después de que la presión natural del yacimiento está agotada, y los métodos tradicionales de recuperación: bombeo artificial, inyección de vapor o agua, etc., no son suficientemente rentables. Algunos de estos métodos son: Combustión In Situ, Inyección de Químicos, Desplazamiento Miscible, etc.

**Saturación:** Porcentaje del volumen en un medio poroso ocupado por una fase.

**Seudo-Presión:** Término inventado por Al-Hussainy et al, para representar y solucionar las ecuaciones de flujo no lineales aplicables a fluidos compresibles en yacimientos de petróleo.

**Simulación Estática:** Representación de un sistema en un solo punto del tiempo. Las simulaciones tipo Monte Carlo son estáticas por naturaleza.

**Simulador:** Paquete de software que permite simular sistemas reales o ficticios.

**Sistema:** Conjunto de componentes o elementos interrelacionados de tal forma que constituyen un solo cuerpo con sus partes conectadas.

**Validación y Verificación de un modelo:** Proceso de constatar que un modelo sí representa o predice aproximadamente el sistema simulado. El error del modelo debe ser cuantificado para lograr esta validación.

**Viscosidad:** Propiedad de un fluido que mide las fuerzas de cizallamiento cuando este se mueve. Un fluido más movable tiene una viscosidad menor

**Yacimiento Depletado:** Yacimiento que ha perdido la fuerza natural o presión necesaria, para producir sus fluidos en forma comercial, por sí mismo.



## BIBLIOGRAFIA

[Adeli, 1995] Adeli Hojjat, Hung, Shin-Lin. Machine Learning. Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems. John Wiley and Sons, Inc. 1995. 211 p.

[Afilaka, 1997] Afilaka, John ; Deimbacher, Franz X. Numerical Well Testing in Complex Reservoirs. Petroleum Engineer International. Jun. 97. Pág. 21

[Agnew, 1968] Agnew R.P. Ecuaciones Diferenciales, 1ª Ed., México Centro Regional de Ayuda Técnica, 1968.

[Al-Hussainy, 1966a] Al-Hussainy R. y Ramey H.J.Jr. Application of Real Gas Flow Theory to Well Testing and Deliverability Forecasting. JPT, pág. 637-41, Mayo, 1966.

[Al-Hussainy, 1966b] Al-Hussainy R., Ramey H.J.Jr. y Crawford P.B. The Flow of Real Gases Through Porous Media. JPT, pág. 621-36, Mayo, 1966.

[Ames, 1962] Ames William F. Numerical Methods for Partial Differential Equations. Academic Press, Inc. Atlanta, Georgia. 3ª Ed. 1992.

[Angeline, 1996] Angeline Peter J., Kinnear Kenneth E. Advances in Genetic Programming. MIT Press, Cambridge, Vol. 2, 1996.

[Arias, 99] Arias López Luis A. Un Contexto de Complejidad para la Evolución del Relieve. Boletín Ciencias de la Tierra. Fac. de Ciencias. Universidad Nacional. Sede Medellín. Nº 13, 1999. Pág. 11-27

[Asociación Colombiana de Geólogos.] Numerical Simulation. Society Of Petroleum Engineers Of AIME. Dallas; Texas. 1973.

[Atkinson, 1978] Atkinson K.E. An Introduction to Numerical Analysis, 1ª Ed., New York, Jhon Wiley, 1978.

[Aziz, 1995] Aziz Khalid. Notes for Petroleum Reservoir Simulation. Stanford University. 1995.

[Aziz, 1976] Aziz K., Mattar L., Ko S. y Brar G.S. Use of Pressure, Pressure-Square or Pseudo-Pressure in the Analysis of Transient Pressure Drawdown Data from Gas Wells. The Journal of Canadian Pet. Tech., pág. 58-65, Abril-Junio, 1976.

[Aziz, 1978] Aziz K. y Settari A. Petroleum Reservoir Simulation 2ª Ed., Londres, Applied Science Publishers, 1978.

[Bassingthwaighte, 1994] Bassingthwaighte, James B. et al. Fractal Physiology. Oxford University Press. 1994.

[Bertalanffy, 86] Bertalanffy Ludwing Von. Perspectivas en la Teoría General de Sistemas. Alianza Editorial. 2ª ed. 1986.

[Bruce, 1953] Bruce G.H., Peaceman D.W., Rachford H.H., y Rice J.D. Calculations of Unsteady-State Gas flow through Porous Media Trans. AIME, Vol. 198. 1953. pág. 79.

[Brumbaugh 1994] Brumbaugh, David E. Object - Oriented Development. Building Case Tools with C++. John Wiley & Sons. New York. 1994

[Calabrese, 1996] Calabrese Luis. Ampliando las Fronteras del Reduccionismo. Dedución y Sistemas no Lineales. <http://www.uyweb.com.uy/psychnet/coloquio-colonia/abstract/calabrese.htm>. 25 Sept 1996.

[Cantú, 1995] Cantú P Erick, Mejía O. Marcelo. Algoritmos Genéticos Paralelos. <http://www.fcencias.unam.mx/revista/soluciones/N17/Mejia2.html>. Oct. 95

[Carter,1962] Carter P.D. Solutions of Unsteady-State Radial Gas Flow . JPT, pág. 549-54, Mayo, 1962.

[Casse, 1979] Casse Francis J, Ramey H.J., Jr. The Effect of Temperature and Confining Pressure on Single-Phase Flow in Consolidated Rocks. JPT, pág. 1051-59, Ago., 1979.

[Chatas, 1963] Chatas A.T. A Practical Treatment of Nonsteady-State Flow Problems in Reservoir Systems. The Petroleum Engineer. pág. B44-B56, Agosto, 1953.

[Civan, 1998] Civan Faruk, Evans R.D. Determining the parameters of the Forcheimer Equation form Pressure-Squared Vs Pseudopressure Formulations. SPERE Feb. 98. pág. 43-46.

[Coello, 1994] Coello C Carlos A. Introducción a los Algoritmos Genéticos. Universidad de Tulane, Nueva Orleans, EUA. 1994.

[Coello, 1995] Coello C Carlos A. <http://www.fcencias.unam.mx/revista/soluciones/N17/Coello2.html>, Introducción a los Algoritmos Genéticos. Oct. 95.

[Collins, 1961] Collins R.E. Flow of Fluids Through Porous Materials 1ª Ed., New York, Reinhold Publishing Corp., 1961.

[Collins, 1997] Collins R.E. Calculations of Unsteady-State Gas Flow Through Porous Media, Corrected for Klinkenberg Effect. Trans. AIME, Vol. 198, pág. 339-40, 1953.

[Cooper, 97] Cooper George A.; Mota José; Cooper Alexander G. Novel Training Simulator Integrates Disciplines. Petroleum Engineer. Ene./97. pág. 89-95.

[Craft, 1991] Craft B. C, Hawkins M. F. Applied Petroleum Reservoir Engineering. 2ª Ed. Prentice Hall, Inc. 1991. New Jersey.

[Dake, 1978] Dake L. P. Fundamentals of Reservoir Engineering. Elsevier Scientific Publishing Company. 1978. New York.

[Derrick, 1984] Derrick W, Grossman S. Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones, 2ª Ed., Mexico, Fondo Educativo Interamericano S.A., 1984.

[Ding yu 1998] Ding Yu et al. Representation of Wells in Numerical Reservoir Simulation. SPERE. Feb. 98. pág. 18-23.

[Ding yu, 1994] Ding Yu, Renard Gerard. A New Representation of Wells in Numerical Reservoir Simulation. SPERE. Mayo 94. pág. 140-144.

[Dorsey, 1999] Dorsey, Paul, Hudicka Joseph R. ORACLE 8. Diseño de bases de datos con UML (Unified Model Language). 1999. Oracle Press. 1 Ed. Madrid. 394.

[Earlougher, 1977] Earlougher R.C.Jr. Advances in Well Test Analysis, Monografía 5, Dallas,SPE, 1977.

[Edwardson, 1962] Edwardson M.J. y otros. Calculation of Formation Temperature Disturbances caused by Mud Circulation, Trans. AIME, Vol 225, pág. 416-426, 1962.

[Ege, 1994] Ege, Raimund. Object-Oriented Programming with C++. 2ª Ed. Ap. Professional. Boston. 1994.

[Eilerts, 1964] Eilerts K.E. Integration of Partial Differential Equation for Transient Lineal Flow of Gas-Condensate Fluids in Porous Estructuras. SPEJ, pág. 291-306, Dic.,1964.

[ERCB, 1979] Energy Resources Conservation Board. Gas Well Testing. Theory and Practice. 4ª Ed. ERCB. Calgary, Alberta. 1979

[Expert, 1993] EXPERT. Inteligent Systems & Their Applications. Genetic Algorithms. IEEE. Oct. 93.

[Eymard, 1992] Eymard R et al. Mathematical and Numerical Properties of Control-Volume Finite-Element Scheme for Reservoir Simulation. SPERE. Agosto 1992.

[Fatt, 1952] Fatt I, Davis D.H. Reduction in Permeability with Overburden Pressure. Trans. AIME, Vol.195, pág.329, 1952.

[Firoozabadi, 1995] Firoozabadi A, Thomas L K, Todd B. High Velocity Flow in Porous Media. SPERE Mayo 95. pág. 149.

[Ford, 1971] Ford W.T. Elements of Simulation of Fluid Flow in Porous Media, 1<sup>a</sup> Ed., Lubbock, Texas, Texas Tech. University, 1971.

[Forcheimer, 1901] Forcheimer P.H. Wasserbewegung durch Boden. Zeitz. ver. Deutsch Ing. Vol. 45, 1901. pág. 1781.

[Foster, 1997] Foster W.R. The equatios of Motion of Fluids in Porous Media : I. Propagation Velocity of Pressure Pulses. SPEJ, pág. 333-41, Dic., 1967.

[Franco, 1998] Franco Alvaro. Colombia Enfrenta Desafíos. En Petróleo Internacional. Junio 1998.

[Fritz, 1982] Fritz J. Partial Differential Equations, 4<sup>a</sup> Ed. New York, Springer-Verlaq, 1982.

[Fung, 1992] Fung L. S. K. et al. Reservoir Simulation with a Control-Volume Finite-Element Method. SPERE. Agosto 1992.

[Gobran, 1987] Gobran B.D., Brigham W.E., Ramey H.J.Jr. Absolute Permeability as a Function of Confining Pressure, Pore Pressure, and Temperature. SPEFE Marzo 87, pág. 77-84, .

[Granados, 1998] Granados Jorge. Algoritmos Genéticos.  
[http://homepages.mty.itesm.mx/~lgranado/alg\\_gen.htm](http://homepages.mty.itesm.mx/~lgranado/alg_gen.htm). 25 Mayo 98.

[Habiballah, 1996] Habiballah W. A., Startzman R. A., Barrufet M. A. Use of Neural Network for Prediction of Vapor/Liquid Equilibrium K Values for Light Hydrocarbon Mixtures. SPERE Mayo 96. pág. 121-126.

[Hageman 81] Hageman Louis A.; Young David M. Applied Iterative Methods. Academic Press, Inc. 1981.

[Haken,1990] Haken, Hermann; Wunderlin, Arne. El Caos Determinista. Mundo Científico. N° 108 Vol. 10. 1990. pág. 1210 - 1217.

[He, 2000] He, Nanqun, et al. Conditioning Stochastic Reservoir Models to Well-Test Data. SPERE Feb. 2000. Pág. 74.

[Heinemann, 1991] Heinemann Z. E. et al. Modelling Reservoir Geometry with Irregular Grids. SPE Reservoir Engineering. Mayo 1991.

[Hildebrand, 1968] Hildebrand F.B. Finite Difference Equations and Simulations, 1<sup>a</sup> Ed. New Jersey, Prentice-Hall. 1968.

[Hojjat 1995] Hojjat Adeli, Shin-Lin Hung. Machine Learning. Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems. John Wiley and sons, Inc. 1995.

[Holland, 1975] Holland J.H., "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press, 1975, 211 p.

[Huggett, 85] Huggett, Richard J. Earth Surface Systems. Springer-Verlag. Berlin. 1<sup>a</sup> Ed. 1985. 269 pág.

[Hurst, 1973a] Hurst W. Solutions of Nonlinear Equations for Flow of Fluids. Parte 1. The Oil and Gas Journal. pág. 105-10, Dic. 10, 1973.

[Hurst, 1973b] Hurst W. Solutions of Nonlinear Equations for Flow of Fluids. Parte 2. The Oil and Gas Journal, pág. 65-68, Dic. 17, 1973.

[Klinkenberg, 1941] Klinkenberg L. J. The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases. Drill and Produc. Pract. API. 1941. pág. 200.

[Koza, 1996] Koza R. John. Genetic Programming II. Automatic Discovery of Reusable Programs. Cambridge. MIT Press. 1996

[Koza, 1992] Koza J.R., "Genetic Programming. On the Programming of Computers by Means of Natural Selection", The MIT Press, 1992, 819 p

[kumar, 1987] Kumar, Sanjay. Gas Production Engineering. Gulf Publishing Company. Vol 4. Houston. 1987.

[Lapidus, 1982] Lapidus L., Pinder G.F. Numerical Solution of Partial Differential Equations in Science and Engineering, 1ed., New York, John Wiley, 1982.

[Larrañaga, 1997] Larrañaga P. Algoritmos Genéticos

<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/9802/3d5ca300.htm>. Nov. - 97

[Lee, 1998] Lee, S.H. et al. Finite Difference Simulation of Geologically Complex Reservoirs with Tensor Permeabilities. SPERE Dic. 98. Pág. 567.

[Lee, 1982] Lee J. Well Testing. Monografía 6, Dallas, SPE, 1982.

[Leithol, 1992] Leithol L. El Calculo con Geometra Analitica. 6ª Ed., Mexico, Harla S.A. de C.V., 1992.

[Lewin, 95] Lewin, Roger. Complejidad: El Caos como generador de Orden. Tusquets Editores. Metatemas 41. Barcelona. 1ª Ed. 1995. 243.

[McCain, 1991] McCain Jr, W.D. Reservoir-Fluid Property Correlations - State of the Art. SPERE, Mayo 91. Pág. 266.

[Mchaney, 1991] McHaney Roger. Computer Simulation - A Practical Perspective. Academic Press, Inc. 1991. 276 pág.

[Masini 80] Masini Giancarlo. Sulle Trace della Vita. Nardini Editore–Centro Internazionale del Libro. Firenze, Italy. 1980

[Mattax, 1990] Mattax Calvin C.; Dalton, Robert L. Reservoir Simulation. Monografía Volumen 13. Society Of Petroleum Engineers. Monograph Series. 1990

[Mattheus, 1967] Matthews C.S. y Russell, D.G. Pressure Buildup and Flow Tests in Wells. Monografía 1, Dallas, SPE, 1967.

[Meisigset, 1999] Meisingset, K. K. Uncertainties in Reservoir Fluid Description for Reservoirs Modeling. SPERE Oct. 99. Pág. 431.

[Michalewicz, 1999] Michalewicz Zbigniew. Genetic Algoritms + Data Structures = Evolution Programs. 3ª Ed. Springer - Verlag. Berlín. 1999. 387 p.

[Mitchell, 1997] Mitchell Melanie. An Introduction To Genetic Algorithms. Massachusetts Institute Of Technology. 1997.

[Montoya, 1999] Montoya Sandra, Jovel William. Diseño Optimo de Redes de Gas utilizando Algoritmos Genéticos. Tesis Ing. Petróleos. Universidad Nacional. Sede Medellín. 1999.

[Occidental de Colombia]. Campo Caño Limón. Modelo de Simulación. 1983.

[Odeh, 1988] Odeh A.S., Babu D.K. Comparison of Solutions of the Nonlinear and Linearized Diffusion Equations. SPERE, pág. 1202-06, Nov., 1988.

[Pastor 1995] Pastor Oscar, Ramos Isidro. OASIS 2.1.1.: A Class-Definition Language to Model Information Systems Using an Object-Oriented Approach. Depto. Sistemas Informáticos y Computación. Universidad Politécnica de Valencia. España.

[Peaceman, 1990] Peaceman D.W. Interpretation of Wellblock Pressures in Numerical Reservoir Simulation.: Part 3. Off-Center and Multiple Wells within a Wellblock. SPERE. Mayo 90. pág. 227-232.

[Peaceman, 1983] Peaceman D.W. Interpretation of Wellblock Pressures in Numerical Reservoir Simulation with Nonsquare Grid Blocks and Anisotropic Permeability. SPEJ. Junio 83. pág. 531-543.

[Peaceman, 1978] Peaceman D.W. Interpretation of Wellblock Pressures in Numerical Reservoir Simulation. SPEJ. Junio 78. pág. 183-194.

[Peaceman, 1977] Peaceman D.W. Fundamentals of Numerical Reservoir Simulation, 1ª. Ed., Amsterdam, Elsevier Scientific, 1977.

[Peebler, 1998] Peebler Robert P. Integración: Nuevo Reto para E&P. Petróleo Internacional. Nov-Dic/98, pág. 18-27

[Perez, 1969] Pérez P.R. Yacimientos con empuje Hidráulico, 1a. Ed. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 1969.



[Petróleo Internacional]. El Gasoducto Panamericano. Dic. de 1999, pág. 28

[Petróleo Internacional]. Colombia Propicia uso del Gas. Junio de 1999, pág. 8

[Petroleum Engineering International]. Predict Permeability from Wireline logs using Neural Networks.. Mayo de 1995. pág. 18.

[Pierre, 1986] Pierre, Donald A. Optimization Theory with Applications. Dover Publications, Inc. New York. 1986.

[Raghavan, 1972] Raghavan R., Scorer J.D.T., Miller F.G. An Investigation by Numerical Methods of the Effect of Pressure Dependent Rock and Fluid Properties on Well Flow Tests. SPEJ, pág. 267-75, Junio, 1972.

[Reeves, 1971] Reeves C. R. An introduction to Genetic Algorithms. Operational Research Tutorial Papers. 1991. p 69.

[Rivera, 1981] Rivera Victor German. Simulación de Yacimientos. Seminario de Ingeniería de Petróleos. 1981. Universidad de América. Bogotá.

[Rowan, 1962] Rowan G. y Clegg, M.W. An Approximate Method for Transient Radial Flow. SPEJ, pág. 225-56, Sept., 1962.

[Ruelle,1993] Ruelle David. Azar y Caos. Alianza Editorial. Madrid. 1993

[Saleri, 1998] Saleri N. G. Re-engineering Simulation: Managing Complexity and Complexification in Reservoir Projects. SPERE. Feb. 98. pág. 5-11.

[Samaniego, 1979] Samaniego F., Brigham W.E., Miller F.G. Performance- Prediction Procedure for Transient Flow of Fluids Through Pressure-Sensitive Formations. JPT, pág. 379-86, Junio, 1979.

[Samaniego, 1977] Samaniego F., Brigham W.E., Miller F.G. An Investigation of Transient Flow of Reservoir Fluids Considering Pressure-Dependent Rock and Fluid Properties. SPEJ, pág. 140-50, April, 1977.

[Samofal, 1998] Samofal, Lara. Process Systems Analysis and Control. Chapter 10: Nonlinear Systems. <http://www4.ncsu.edu/~ajschult/che425/lecture10.html>. 1998.

[Sánchez, 2001] Sánchez S., Paola ; Torres O, José L. ; Hernández R., Jesús A. Un modelo Genético-Objetual para la Optimización de redes en GIS. Tesis Ing. Industrial (Próxima a entregar). Facultad de Minas. UNAL, Medellín. 2001.

[Senge, 1994] Senge, Peter M. et al. The Fifth Discipline. Bantam Doubleday Dell Publishing Group, Inc, 1ª Ed., 1994, 593 pág.

[Settari, 1992] Settari A., Aziz K. Use of Irregular Grid in Reservoir Simulation, SPEJ. pág 103-109. Abril, 1972.

[Smith, 1977] Smith J., Wolford A. Applied Numerical Methods for Digital Computation with Fortran and CSMP, 2ed., 1977.

[Solé, 1996] Solé, Richard V., Manrubia, Susanna. Orden y Caos en Sistemas Complejos. Edicions UPC. 1996.

[Tello, 1989] Tello Ernest R. Object Oriented Programming for Artificial Intelligence. Addison Wesley. Massachusetts; 1989.

[Thomas, 1983] Thomas G. W., Thurnau D.H. Reservoir Simulation using an Adaptive Implicit method. SPEJ. Oct. 83. pág. 759-768.

[Torres, 2000a] Torres O. José L., Hernández R. Jesús A. Modelación de Sistemas no Lineales por Algoritmos Genéticos y Orientación a Objetos. Presentado y publicado en: CLEI2000 (XXVI Conferencia Latinoamericana de Informática). México, Tec. De Monterrey, Sept. 2000.

[Torres, 2000b] Torres O. José L., Hernández R. Jesús A. Modelación de Sistemas no Lineales por Algoritmos Genéticos y Orientación a Objetos. Presentado y publicado en: V Congreso sobre Modelamiento Numérico y Elementos Finitos. Medellín, Univ. EAFIT, Oct. 2000.

[Torres, 2000c] Torres O. José L., Hernández R. Jesús A. Modelación de Sistemas Complejos Naturales por Algoritmos Genéticos y Orientación a Objetos. Presentado y publicado en: III Taller en Renovación y Adaptación de Sistemas.. Medellín, UNAL, Ago. 2000.

[Torres, 2000d] Torres O. José L., Hernández R. Jesús A. Modelación de Sistemas Complejos Naturales por Algoritmos Genéticos y Orientación a Objetos. Presentado y publicado en I Jornadas Internacionales en Computación Evolutiva. Montería, UNISINU, Jul. 2000.

[Torres, 1999] Torres O. Torres J. L., Hernández J. A. An OO - Genetic Model to Non-linear Systems Solution. Presentado y publicado en: II Taller en Renovación y Adaptación de Sistemas.. Medellín, UNAL, Mar.1999.

[Torres, 1994] Torres O. José L. Evaluación de las Limitaciones de las Ecuaciones Fundamentales de Flujo. Tesis UNAL. Sede Medellín. 1994.

[Van Everdingen, 1949] Van Everdingen A.F., Hurst W. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoir Petroleum. Trans. AIME, Vol. 186, pág. 305-24, Dic., 1949.

[Velásquez, 1997a] Velásquez Juan D., Hernández Jesús A. Hydrological Forecasting by Genetic Programming. UNAL. 1997

[Velásquez, 1997b] Velásquez Juan D. Predicción Hidrológica Utilizando Programación Genética. Msc Tesis. UNAL Sede Medellín. 1997.

[Viera, 1990] Viera Oballa et al. Adaptive-Implicit Method in Thermal Simulation. SPERE Nov. 90. pág. 549-554.

[Villermaux, 1993] Villermaux Jacques. La Ingeniería de Procesos. Mundo Científico. N° 118 Vol. 11. 1993. Pag. 1094- 1103.

[Von, 1986] Von Bertalanffy Ludwing. Perspectivas en la Teoría General de Sistemas. Alianza Editorial. 2ª Ed. 1986.

[Wang, 1999] Wang, L., et al. Modeling Porosity Distribution in the A'n'an Oilfield : Use of Geological Quantification, Neural Networks and Geostatistics. SPERE Dec. 99. Pág. 527.

[Wattenbarger, 1968] Wattenbarger R.A., Ramey H.J.Jr. Gas Well Testing with Turbulence, Damage and Wellbore Storage. JPT Ago. 68, pág. 877-87.

[Weinbrandt, 1975] Weinbrandt R.M., Ramey H.J.Jr., Casse F.J. The Effect of Temperature on Relative and Absolut. Permeability of Sandstones. SPEJ, pág. 376-84, Oct., 1975.

[Xiong, 1997] Xiong Hongjie et al. A Comprehensive Approach Using Fuzzy Logic to Select Fracture Fluid Systems. Petroleum Engineer. Enero 97. pág. 77.

[Xiong, 1995] Xiong Hongjie et al. An Investigation into Application of Fuzzy Logic to Well Stimulation Treatment Design. Society of Petroleum Engineers Computer Applications. Feb. 95. pág. 18

**ANEXOS**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE EN SIMULACION DE YACIMIENTOS.....</b>	<b>1</b>
<b>2. FUNDAMENTOS TEORICOS.....</b>	<b>6</b>
2.1 COMPLEJIDAD Y NO LINEALIDAD DE LOS SISTEMAS .....	6
2.1.1 <i>Introducción</i> .....	6
2.1.2 <i>Tipos de complejidad</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.1.3 <i>Definición y características de la Linealidad y No Linealidad</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.2 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE FLUJO EN YACIMIENTOS DE PETROLEO.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.2.1 <i>Ecuaciones de Difusividad para flujo monofásico unidimensional en coordenadas cartesianas</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.2.2 <i>Ecuaciones de Difusividad para flujo monofásico en coordenadas radiales</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3 SIMULACION DE SISTEMAS ASISTIDA POR COMPUTADOR.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3.1 <i>Beneficios</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3.2 <i>Limitaciones</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3.3 <i>Posibles usos</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3.4 <i>Tipos de simulación</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3.5 <i>Aspectos que se deben considerar antes de cualquier Simulación...</i>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3.6 <i>Consideraciones que se deben hacer durante y después de la Simulación</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4 SIMULACION NUMERICA DE YACIMIENTOS DE PETROLEO.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.1 <i>Visión General</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.2 <i>Tipos de Simuladores</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3 <i>Simulación Numérica y Discretización</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.1 <i>Discretización en el espacio</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.1.1 <i>Representación y Nomenclatura de los bloques.</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.1.2 <i>Distribución Uniforme.</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.1.3 <i>Distribución Irregular</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.2 <i>Discretización en el tiempo</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.3 <i>Interpretación del proceso de discretización y los intervalos de espacio y tiempo.</i>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.4 <i>Problemas generados por la discretización.</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.4.1 <i>Representación de pozos.</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.4.2 <i>Puntos para la evaluación de propiedades</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.4.3 <i>Dispersión Numérica.</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.4.3 <i>Efectos de orientación de la malla</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.5 <i>Métodos de Solución para el Modelo Numérico</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.3.6 <i>Error, Consistencia, Covergencia y Estabilidad de un Modelo Numérico</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.4 <i>Diseño del Modelo para el Yacimiento</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.4.1 <i>Selección del número de dimensiones o estructura espacial</i> ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.4.2 <i>Simplificación del modelo</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.4.3 <i>Selección de los datos para las propiedades de la formación y los fluidos</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.5 <i>Ajuste de la Historia de un Yacimiento</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5 ALGORITMOS GENÉTICOS.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5.1 <i>Visión General y Definición</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5.2 <i>Componentes básicos de un algoritmo genético</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5.3 <i>Operadores Genéticos</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5.3.1 <i>Selección</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5.3.2 <i>Cruce (Crossover)</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

2.5.3.3 Mutación.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.4 Inversión.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.5 Operación de Dominancia.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.4 Diseño del Algoritmo Genético .....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.5 Tipos de Algoritmos Genéticos .....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.5.1 Algoritmos Genéticos Generacionales.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.5.2 Algoritmos Genéticos de Estado Fijo.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.5.3 Algoritmos Genéticos Paralelos (AGP's).....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.6 Areas de aplicación de los AG's .....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.7 Ventajas y desventajas respecto a otras técnicas de búsqueda .....	¡Error! Marcador no definido.
2.6 PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS.....	¡Error! Marcador no definido.
2.6.1. Características de la OOP .....	¡Error! Marcador no definido.
2.6.2 El modelo de objetos.....	¡Error! Marcador no definido.
<b>3. SIMULACION MONOFASICO - TRIDIMENSIONAL DEL CAMPO DE GAS GÜEPAJE - AYOMBE UTILIZANDO UN MODELO GENETICO-OBJETUAL.....</b>	¡Error! Marcador no definido.
3.1 DESCRIPCIÓN DEL YACIMIENTO PROBLEMA.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2 PROBLEMA A MODELAR .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3 MODELO PARA LA SIMULACIÓN DEL CAMPO GÜEPAJÉ - AYOMBÉ .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.1 Modelo Genético-Objetual (OOGM): Un Modelo Evolutivo Orientado a Objetos.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.2 Discretización Evolutiva del Yacimiento.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.2.1 Consideraciones básicas para la división del yacimiento .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.2.2 Algoritmo Genético-Objetual para la particion espacial del yacimiento.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.3 Modelo Evolutivo para la Solución de Sistemas de Ecuaciones Algebraicas no Lineales.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.3.1 Modelo General.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.3.2 Modelo Genético .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.3.3 Modelo Objetual .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.4 Modelo Evolutivo para la Solución de la Distribución de las Presiones a través del Modelo 3D para el yacimiento.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.4.1 Planteamiento de Ecuaciones numéricas para flujo de un fluido compresible en tres dimensiones.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.4.2 Condiciones de Frontera y Condición Inicial.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.4.2 Modelo para la simulación evolutiva de la distribución de la caída de presión a través del yacimiento.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.4.2 Diagrama de flujo de información para el distribuidor evolutivo de información.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4 IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO GENETICO-OBJETUAL PARA LA SIMULACION DE PRODUCCION DEL POZO GÜEPAJÉ 1 DEL CAMPO GÜEPAJÉ-AYOMBE.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4.1 Simulador con distribuidor de presiones evolutivo.....	¡Error! Marcador no definido.
Algunas de las características más importantes del programa simulador fueron:.....	¡Error! Marcador no definido.
Orden de procesos del programa .....	¡Error! Marcador no definido.
1. Leer y dibujar puntos frontera para planos xy y xz.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4.2 Simulador implícito típico.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5 ANALISIS DE RESULTADOS.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.1 Simulador con Distribución de Presión Evolutivo .....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.1.1 Error del simulador.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.1.2 Convergencia del simulador.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.1.3 Distribución de Presiones para $t > t_{inicial}$ .....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.1.4 Parámetros de la ecuación de distribución para $t > t_{inicial}$ .....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.2 Simulador con distribución de presión estándar .....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.2.1 Error y convergencia del simulador.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.2.2 Distribución de Presiones para $t > t_{inicial}$ .....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.3 Comparación de resultados entre ambos simuladores y datos reales.....	¡Error! Marcador no definido.
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	¡Error! Marcador no definido.

**GLOSARIO.....¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**  
**BIBLIOGRAFIA.....¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**  
**ANEXOS.....132**



