

01124  
15

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

CONSTRUCCIÓN DE MALLAS PARA SIMULACIÓN  
NUMÉRICA DE YACIMIENTOS.

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO PETROLERO**  
**P R E S E N T A :**  
**RAMÓN GÓMEZ MARÍN**

DIRECTORES DE TESIS:

ING. FABIÁN LÓPEZ CAMBRÓN  
M.I. JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ GUEVARA



Autorizo a la Dirección General de  
UNAM a difundir en formato electrón.  
contenido de mi trabajo

NOMBRE: Gómez

MÉXICO Marín Ramón

FECHA: 13/06/2003.

FIRMA: [Firma]

2003.

[Firma]



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# **PAGINACIÓN DISCONTINUA**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-1494

SR. RAMON GOMEZ MARIN  
Presente

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. José A. González Guevara y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

### CONSTRUCCION DE MALLAS PARA SIMULACION NUMERICA DE YACIMIENTOS

- I INTRODUCCION
- II LA SIMULACION DE YACIMIENTOS PETROLEROS
- III PARTICION DEL ESPACIO
- IV DIVERSOS TIPOS DE MALLAS
- V CONSTRUCCION DE MALLAS
- ALGORITMO PARA CONSTRUIR UNA MALLA
- CONCLUSIONES
- APENDICE

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, D. F., a 15 de noviembre de 2001  
EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg

R

b



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TESIS:**

**CONSTRUCCIÓN DE MALLAS PARA SIMULACIÓN  
NUMÉRICA DE YACIMIENTOS**

**PRESENTA**

**RAMÓN GÓMEZ MARÍN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**JURADO:**

**PRESIDENTE: M.I. NÉSTOR MARTÍNEZ ROMERO**

**VOCAL: M.I. JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ GUEVARA**

**SECRETARIO: ING. MANUEL VILLAMAR VIGUERAS**

**1ER. SPTE: ING. AGUSTÍN GALINDO NAVA**

**2DO. SPTE: M.I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ**

México, D.F., mayo de 2003

C

## AGRADECIMIENTOS

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

A mi madre, por haberme dado su cariño, su confianza y su apoyo incondicional.

A mis amigos, por haber compartido conmigo tantas experiencias, y por haberme animado cuando lo necesité.

A Vanessa, esa persona tan especial, por su motivación, ternura y amor.

A mis compañeros y amigos del IMP por su amistad, al Ing. Santos por su colaboración, y sobre todo al Ing. Fabián López Cambrón por su asesoría y paciencia en la elaboración de este trabajo.

Al Ing. José Antonio González Guevara por su ayuda en la elaboración de este trabajo.

## **INDICE**

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>1. CAPÍTULO I LA SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS PETROLEROS</b>	<b>3</b>
1.1 Tipos de modelos	3
1.1.1 Modelos análogos	3
1.1.2 Métodos experimentales	4
1.1.2.1 Modelo analógico	4
1.1.2.2 Modelo físico	5
1.1.3 Métodos matemáticos	5
1.1.3.1 Ecuaciones de balance de materia	5
1.1.3.2 Análisis de curvas de declinación	6
1.1.3.3 Correlaciones	7
1.1.3.4 Métodos analíticos	7
1.1.4 Modelos numéricos	8
1.2 Descripción general de los modelos numéricos de simulación	9
1.3 Tipos de simuladores	11
1.3.1 Simuladores de aceite negro	12
1.3.2 Simuladores composicionales	13
1.3.3 Simuladores térmicos	13
1.3.4 Simuladores de inyección de químicos	14
1.4 Propósito de la simulación de un yacimiento	14
<b>2. CAPITULO II PARTICIÓN DEL ESPACIO</b>	<b>18</b>
2.1 Celdas y pasos de tiempo	18
2.2 Consecuencias de la discretización	20
2.2.1 Representación de los pozos	20

	21
2.2.2 Ponderación de la movilidad	
2.2.3 Dispersión numérica	21
2.2.4 Efectos de la orientación de la malla	22
2.2.5 Ortogonalidad de la malla	22
2.3 Criterios de selección para el tamaño de la celda	23
2.4 Selección del tamaño de la celda	23
2.5 Lugares donde la presión y la saturación deben ser calculadas	24
2.6 Representación de la geometría	24
2.7 Distribución de la saturación y la presión en el yacimiento en el tiempo	25
2.8 Cálculo de presión y producción de pozos en relación con el tamaño de la celda	25
2.9 Tamaño de la celda y cálculo de la eficiencia de desplazamiento	28
2.9.1 Segmentación areal	28
2.9.2 Segmentación vertical	30
3. CAPÍTULO III DIVERSOS TIPOS DE MALLAS	32
3.1 Cartesianas	32
3.1.1 Malla con nodo centrado	33
3.1.2 Malla con nodo distribuido	35
3.2 Geometría de mallas areales	36
3.2.1 Geometría con coordenadas rectangulares	37
3.2.2 Malla con geometría cilíndrica	39
3.2.3 Malla con geometría de punto esquina	42
3.3 Refinamientos locales y mallas híbridas	43
3.3.1 Mallas curvilineas ortogonales	44
3.4 Mallas de geometría vertical	46
3.4.1 Mallas curvilineas ortogonales	46
3.4.2 Mallas irregulares	48

<b>4. CAPÍTULO IV CONSTRUCCIÓN DE MALLAS</b>	<b>56</b>
4.1 Antecedentes del yacimiento en estudio	56
4.1.1 Características de la formación	56
4.1.1.1 Estudio de caracterización	57
4.1.1.2 Límites del yacimiento	57
4.1.1.3 Análisis de fluidos	58
4.1.1.4 Características de la malla	58
4.1.1.5 Volumen original de hidrocarburos	58
4.1.1.6 Problemática del campo	59
4.2 Construcción gráfica de la malla	59
<b>5. CAPÍTULO V ALGORITMO PARA CONSTRUIR UNA MALLA</b>	<b>67</b>
5.1 Requerimiento de datos geológicos	67
5.2 Generación de mallas	68
5.3 Construcción de la malla PEBI	69
5.3.1 Malla PEBI en 3D	70
5.3.1.1 Primer método de la construcción de la malla	70
5.3.1.1.1 Posición de los puntos de la celda	72
5.3.1.1.2 Construcción de la celdas	74
5.3.1.2 Segundo método de la construcción de la malla	76
5.3.1.2.1 Localización de los puntos de la celda	76
5.3.1.2.2 Construcción de la celda	77
5.3.2 Construcción de la malla PEBI 3D	79
5.3.2.1 Localización de los puntos de la celda	79
5.3.2.2 Construcción de las celdas	80
5.3.2.3 Proyección vertical de la malla	82
5.3.2.4 Sección cruzada	83

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>87</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>90</b>
<b>APENDICE A MALLADORES COMERCIALES</b>	<b>92</b>

## RESUMEN

El presente trabajo fue realizado en el Instituto Mexicano del Petróleo con la colaboración del personal que labora en área de Yacimientos Naturalmente Fracturados. En la primera parte se trata de dar a conocer lo que es la simulación de yacimientos petroleros, donde se comentan algunos aspectos generales de los modelos empleados en la simulación, así como también los tipos de simuladores comúnmente utilizados en la actualidad y el propósito de la simulación en la industria petrolera.

En la segunda parte se describen algunas de las características y criterios que deben ser contemplados durante la construcción de una malla, que posteriormente servirá para representar las características heterogéneas del yacimiento y de esta manera realizar el estudio de simulación. Esto es muy importante ya que de esto dependerá la veracidad de los resultados que arroje el simulador.

Después de haber descrito algunos criterios de la construcción de la malla se procede a describir los diversos tipos de mallas, así como la utilidad de estas para resolver diferentes problemas en un estudio de simulación.

Para ejemplificar la construcción de una malla, se describen los pasos a seguir en el capítulo cuatro. La malla se construye tomando datos reales de un yacimiento mexicano y utilizando un mallador comercial comúnmente utilizado.

Para finalizar, se describe la construcción de una malla irregular PEBI mediante un algoritmo. Se describe el proceso para dos y tres dimensiones.

## INTRODUCCIÓN

La industria petrolera representa para nuestro país una importante fuente de ingresos, por lo cual es indispensable optimizar la explotación de este recurso. Una de las alternativas con las que se cuenta para realizar esto es mediante la simulación de yacimientos petroleros.

La simulación de yacimientos es una disciplina relativamente nueva, ya que el uso de los métodos para realizar un estudio de simulación estaba restringido en el pasado por la capacidad de los equipos de cómputo. En la actualidad se cuenta con equipos muy sofisticados, que tienen la capacidad de almacenar mucha información así como de realizar un gran número de cálculos en un breve periodo de tiempo.

De esta manera la simulación de yacimientos permite realizar predicciones con diferentes alternativas de explotación, para así poder determinar las operaciones óptimas de recuperación de hidrocarburos que generen mayores beneficios.

Debido a todo esto, cabe resaltar la importancia de la construcción de mallas para así desarrollar estudios de simulación de yacimientos, ya que la malla representa gráfica y numéricamente a los yacimientos; y los resultados de los estudios de simulación dependen en gran parte de la correcta selección de la malla así como también de las características del tamaño e intervalos de tiempo.

La construcción de la malla no es un trabajo sencillo, debido a que los yacimientos tienen formas muy diversas, cuentan con un gran número de fallas y fracturas, y agregando a esto la heterogeneidad de sus propiedades. Por lo cual el Ingeniero debe construir la malla tomando en cuenta todas las características que pudiesen afectar el estudio de simulación.

## 1. LA SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS PETROLEROS

Se define "simular" como *asumir la apariencia de algo*. La simulación de yacimientos petroleros se refiere a la construcción y operación de un modelo cuyo comportamiento asume la apariencia del comportamiento real del yacimiento. Los principales tipos de modelos usados en simulación se describen enseguida:

### 1.1 Tipos de Modelos

El tipo de modelo a utilizar depende de la información disponible para hacer la predicción del comportamiento, así como de las necesidades del estudio.

#### 1.1.1 Modelos Análogos

Antes de la perforación, cuando los datos están limitados o no están disponibles, el único método que puede utilizarse en la ingeniería de yacimientos para hacer un análisis económico es una analogía. Los yacimientos de la misma región con propiedades petrofísicas similares se utilizan para predecir el comportamiento del yacimiento estudiado. Este método puede utilizarse para estimar factores de recuperación, gastos iniciales de producción, gastos de declinación, espaciamento de los pozos y mecanismos de recuperación.

### 1.1.2 Métodos Experimentales

Estos modelos requieren de mediciones en laboratorios. Los más comúnmente utilizados son las pruebas en núcleos.

#### 1.1.2.1 Modelo Analógico

Se usan poco en la actualidad. Fueron importantes en estudios de desplazamiento de aceite por agua, principalmente para evaluar la eficiencia de barrido e incorporarla en los cálculos de inyección de agua.

Los modelos analógicos se basan en similitudes entre el flujo de fluidos a través de un medio poroso y otros fenómenos físicos para simular el comportamiento del yacimiento. Tal es el caso de: flujo de fluidos a través de placas paralelas (modelo Hele-Shaw), y el flujo eléctrico en un circuito (sistema RC). Se puede observar algunos modelos en la Tabla 1.1

Fenómeno	Flujo de fluidos a través de medios porosos	Flujo de fluidos a través de placas paralelas	Flujo eléctrico a través de un circuito
Ecuación Gobernante	Ley de Darcy	Ley de Hagen-Poiseuille	Ley de Ohm
	$q = \frac{\beta}{\mu} \frac{kA}{\Delta L} \frac{\Delta p}{\Delta L}$	$q = \frac{w^2 A}{12 \mu} \frac{\Delta p}{\Delta L}$	$I = (1/R)\Delta E$

Tabla 1.1 Fenómenos físicos análogos al flujo de fluidos a través de medios porosos<sup>1</sup>.

### **1.1.2.2 Modelo Físico**

En los modelos físicos se hacen mediciones directas de las propiedades de flujo en medios porosos. Se utilizan dos tipos de modelos físicos en la industria petrolera. El primero no considera la geometría del flujo de los fluidos en el yacimiento. Los desplazamientos en núcleos caen dentro de esta categoría. Estos, son los modelos físicos más utilizados en la industria petrolera.

El segundo tipo de modelo físico, modelos escalados, utiliza similitudes geométricas, mecánicas y térmicas. La geometría areal, espesor, porosidad y permeabilidad del modelo y las propiedades del fluido son escaladas por eso la forma, la dimensión, y la relación de fuerzas presentes del modelo son semejantes a las del yacimiento.

### **1.1.3. Métodos Matemáticos**

Los modelos matemáticos, que incluyen balance de materia, curvas de declinación, correlaciones y métodos analíticos, son, quizá, los más comúnmente utilizados por la ingeniería petrolera. La aplicación de estos procedimientos puede hacerse a base de gráficas o con calculadoras personales.

#### **1.1.3.1 Ecuaciones de Balance de Materia**

La ecuación de balance de materia, modelo de tanque o de cero dimensiones, representa matemáticamente el comportamiento de un yacimiento. El principio básico del modelo es la conservación de la masa: la suma de la materia remanente en el yacimiento después de un intervalo de producción es igual a la suma de la materia inicial en el yacimiento menos la suma de la materia producida del

yacimiento, más la suma del material adicionado al yacimiento. Dos formas de la ecuación de balance se muestran en la Tabla 1.2.

Tipo de Yacimiento	Ecuación de Balance de Materia	Términos desconocidos
Yacimiento de aceite con casquete de gas y entrada de agua	$N = \frac{N_p [B_r + B_g (R_p - R_w)] - (W_i - W_p)}{m B_w \left( \frac{B_g}{B_w} - 1 \right) + (B_i - B_w)}$	$N, W_e, m$
Yacimiento inicialmente bajosaturado	$N = \frac{N_p \left( 1 + \Delta \rho_w c_w \right) - \frac{W_i - W_p}{B_w} (1 - S_w)}{\Delta \rho_w [c_w + c_w - S_w (c_w - c_w)]}$	$N, W_e$

Tabla 1.2 Ecuaciones de balance de materia por tipo de yacimiento<sup>1</sup>.

### 1.1.3.2 Análisis de Curvas de Declinación

En muchos casos es posible representar la declinación de la producción de un yacimiento con alguna de las curvas: exponencial, hiperbólica y declinación armónica. La forma general de la ecuación de la curva de declinación es:

$$D = Kq^b = -(dq/dt)/q \dots \dots \dots (1.1)$$

Donde;

b=0 para la declinación exponencial

0 < b < 1 para una declinación hiperbólica

b=1 para una declinación armónica,

q= gasto

D= declinación

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$K = \text{constante} = D_i/q_i^b$ .

La aplicación de este método se hace de la siguiente manera: Se selecciona un modelo de declinación, se hace un ajuste con los datos de la historia de producción por medio de la selección de los parámetros de declinación,  $D_i$  y  $b$ , que minimizan el error entre los datos y la ecuación de gasto en función del tiempo. La ecuación ajustada permite realizar predicciones.

#### 1.1.3.3 Correlaciones

En este método se usan correlaciones empíricas derivadas de información del comportamiento pasado de numerosos yacimientos para predecir el comportamiento futuro de otros. Esta aproximación, puede considerarse como una extensión formal los modelos análogos. Una correlación se genera de los datos de un yacimiento en avanzado estado de explotación localizado en la misma región, con la misma litología, y operando bajo el mismo mecanismo de desplazamiento. Se usan en la evaluación de reservas.

#### 1.1.3.4 Métodos analíticos

Los modelos analíticos se basan en la solución exacta de los modelos derivados teóricamente. Las ecuaciones que dan la distribución de la presión transitoria y la ecuación de Buckley-Leveret son ejemplos de modelos analíticos. El desarrollo de esos modelos preserva la física de los procesos que ocurren en el yacimiento, pero a veces las ecuaciones son tan complejas que, en general no pueden ser resueltas con procedimientos comunes de matemáticas. Por esta razón, los modelos analíticos arrojan soluciones exactas solo para problemas sencillos. De esta manera representan en forma continua el comportamiento del espacio y el tiempo en el yacimiento.

#### 1.1.4. Modelos Numéricos

Debido a la naturaleza de las ecuaciones que representan el comportamiento de los fluidos en el yacimiento, se requiere el uso de métodos numéricos. Actualmente los modelos numéricos se usan extensamente en la industria petrolera. Estos modelos pueden representar el comportamiento de un yacimiento por muy complejo que este sea; pero a diferencia de los modelos analíticos los resultados se expresan en forma discontinua. Con un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales no lineales de segundo orden, sus condiciones iniciales y sus condiciones de frontera que describen al yacimiento y sus procesos más relevantes, se predice el comportamiento de los yacimientos. Para el desarrollo de un simulador se hace lo siguiente:

- a) Formulación de las ecuaciones. Se describe los principales procesos de recuperación presentes. Se aplican las ecuaciones a un volumen de control.
- b) Se aplica un proceso de discretización al conjunto de ecuaciones diferenciales parciales para convertirlo en un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales.
- c) Se aplica un proceso de linealización de las ecuaciones para obtener un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales. Como puede ser el método de linealización directa, el de extrapolación y el método semi-implícito.
- d) Se aplica un método de solución de las ecuaciones algebraicas lineales. Como puede ser el método explícito, implícito y semi-implícito. Se obtiene distribuciones de presión, de saturación y gastos de pozos. Y en casos generales también la composición de la fase líquida como gaseosa.
- e) Se lleva a cabo un proceso de validación del modelo y se aplica.

## 1.2 Descripción General de los Modelos Numéricos de Simulación

A continuación se describe algunos de los aspectos involucrados en un simulador. Los modelos numéricos utilizan computadoras que tienen que resolver un gran número de operaciones, mediante métodos numéricos, las ecuaciones matemáticas que describen los procesos que ocurren en el yacimiento para obtener soluciones numéricas.

El proceso de formulación da como resultado una serie de ecuaciones no lineales que describen el flujo de fluidos a través de medios porosos. Si las ecuaciones derivadas de la formulación se resolvieran analíticamente, darían resultados en forma continua como función del tiempo y de la posición. Pero la naturaleza altamente no lineal de las ecuaciones, impide la solución analítica y se debe obtener por métodos numéricos, para esto previamente se deben utilizar métodos de linealización para convertir las ecuaciones no lineales en lineales.

El propósito de la simulación es estimar la respuesta de un campo bajo uno o varios esquemas de producción; considerando que el campo puede producir solo una vez, pero un modelo puede correr muchas veces con bajos costos en un corto período de tiempo. Observando el comportamiento de un modelo bajo diferentes condiciones de producción, nos ayuda a seleccionar un óptimo sistema de producción para el yacimiento.

Se subdivide al yacimiento en bloques mediante una red de 1, 2 o 3 dimensiones. Esta es la malla del yacimiento. Puede demostrarse que las ecuaciones del modelo de simulación son equivalentes a la ecuación de balance de materia volumétrico escritas para cada fase de cada bloque. El flujo entre cada bloque y sus dos, cuatro o seis bloques adyacentes, es representado por la ecuación de Darcy modificada por el concepto de permeabilidad relativa.

Las propiedades del yacimiento tal como la permeabilidad y la porosidad, y las propiedades del fluido tal como la presión, temperatura, y la composición se supone de manera uniforme a lo largo de los bloques dados. Sin embargo, las propiedades del yacimiento y de los fluidos varían de un bloque a otro; las propiedades de los fluidos en cada bloque varían durante cada periodo de simulación.

Un modelo de simulación se crea mediante una ecuación diferencial en derivadas parciales que requiere solución numérica.

Las razones de esto son:

- 1) Heterogeneidad del yacimiento. Permeabilidad y porosidad variable y geometría irregular.
- 2) Relación permeabilidad relativa y presión capilar no lineal contra saturación.
- 3) Propiedades PVT del fluido como función de la presión, composición y temperatura.

Los modelos requieren alta velocidad de cómputo por la gran cantidad de cálculos aritméticos asociados con la solución.

La ecuación 1.2 expresa la conservación de la fase aceite en un simulador en que el comportamiento de fases se expresa como función de la presión. Otras ecuaciones similares hacen lo mismo para las fases agua y gas.

La ecuación está en diferencias finitas y describe la matriz de un yacimiento:

$$T_{i,i-1}^{n+1} [p_{i,i-1} - p_i - (\gamma \Delta D)_{i,i-1}]^{n+1} - T_{i,i+1}^{n+1} [p_i - p_{i+1} - (\gamma \Delta D)_{i,i+1}]^{n+1} + q_i^{n+1} = \frac{Vr_i}{\Delta t} \left[ \left( \frac{\phi}{B} \right)_{i,i}^{n+1} - \left( \frac{\phi}{B} \right)_{i,i}^n \right] \quad (1.2)$$

donde:

$n$ = nivel de tiempo (1,2,3...)  
 $i$ = posición (1,2,3...)  
 $t$ = tiempo  
 $\gamma$ = peso específico de la fase  
 $T$ = transmisibilidad  
 $\phi$ = porosidad  
 $p$ = presión  
 $D$ = profundidad  
 $V_r$ = volumen de roca  
 $B$ = factor de volumen

### 1.3 Tipos de simuladores

En un sentido amplio desde 1930 se han hecho estudios de simulación de yacimientos. Básicamente con modelos analíticos de cero, balance de materia, y de una dimensión, Buckley-Leverett.

Los expertos consideran, desde hace ya más de una década, que la pregunta no es si aplicar simulación sino que tipo de simulador usar. Se usan diferentes tipos de modelos de simulación para describir los diferentes mecanismos asociados con los diferentes procesos de recuperación de aceite. Los más extensamente usados son el de aceite negro, composicional, térmico y de inyección de químicos. Los cuatro mecanismo básicos de recuperación de aceite del yacimientos son:

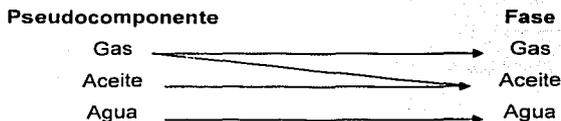
1. Expansión del fluido
2. Desplazamiento
3. Segregación gravitacional
4. Imbibición capilar

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La simple expansión de los fluidos debido a la declinación de la presión da como resultado la expulsión de aceite y el subsecuente flujo a través de los poros de la matriz. El aceite es desplazado por el gas e inyectado o naturalmente invadido por agua. La segregación gravitacional (agua / aceite o aceite / gas) es causada por la diferencia de densidades, ayudando a la recuperación de aceite por causa de la segregación dirigida hacia arriba y el avance del agua en el fondo, y la segregación hacia abajo del contacto agua aceite por la declinación de la presión. Finalmente, la imbibición, normalmente en la dirección del flujo, puede ser un mecanismo importante de recuperación en la inyección lateral de agua en arenas heterogéneas con gran variación vertical de la permeabilidad.

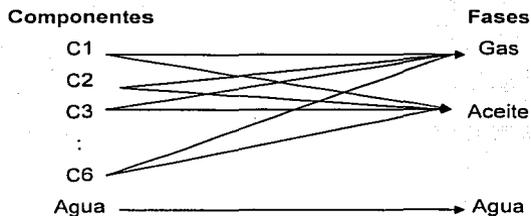
### 1.3.1 Simuladores de aceite negro

Este es el modelo más simple puede utilizarse para estudios de agotamiento primario o de recuperación secundaria por medio de inyección de gas o de agua. Cuenta con los cuatro mecanismos de desplazamiento básico. Los modelos de este tipo se han utilizado durante años y se basan en la suposición de que los fluidos del yacimiento pueden representarse por medio de tres pseudocomponentes (agua, aceite y gas). Distribuidos esquemáticamente en las tres fases como se muestra a continuación:



### 1.3.2 Simuladores composicionales

Los modelos composicionales se utilizan para simular los procesos de recuperación para los cuales no sean válidas las suposiciones hechas en el modelo de aceite negro. En esta categoría se incluyen los yacimientos de gas y condensado con condensación retrógrada y los yacimientos de aceite volátil, cuya composición varía continuamente al existir pequeños cambios de presión y/o temperatura. Este tipo de simuladores supone en cambio, que los fluidos contenidos en el yacimiento son una mezcla formada por N-componentes hidrocarburos más el agua, que en forma esquemática están distribuidos en la siguiente forma:



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 1.3.3 Simuladores térmicos

Este tipo de modelos se utilizan para simular el comportamiento de los yacimientos sujetos a algún proceso de recuperación mejorada por medio de métodos térmicos cuyo objetivo principal es el de proporcionar energía calorífica al aceite con el fin de disminuir su viscosidad y de esta forma, facilitar su flujo hacia los pozos productores, esto es posible gracias a la incorporación de la ecuación de energía.

### 1.3.4 Simuladores de inyección de químicos

Estos son capaces de reproducir el comportamiento de los yacimientos cuando se someten a procesos de inyección de químicos. Los modelos que se utilizan en este tipo de estudios, presentan un mayor grado de complejidad pues deben de considerar tanto la interacción que existe entre los propios fluidos químicos, como la que hay entre dichos fluidos y el medio poroso.

### 1.4 Propósito de la simulación de yacimiento

La simulación de yacimientos es utilizada para estimar la recuperación de un esquema de producción dado para evaluar los efectos en la recuperación al alterar las condiciones de operación, y comparar económicamente los diferentes métodos de recuperación. Los modelos de aceite negro han sido extensamente aplicados para prever la recuperación de aceite y para estimar los efectos en la recuperación de aceite en:

1. Patrón y espaciamiento de los pozos.
2. Intervalos de terminación del pozo.
3. Conificación de agua o aceite como función del ritmo de producción.
4. Ritmo de producción.
5. Aumento natural del manejo de agua por inyección de agua y conveniencia de los patrones de inyección de agua de flanco o periférica.
6. Perforaciones
7. Inyección de agua, gas y la alternancia de agua y gas.

Los modelos composicionales también se han utilizado para los mismos y algunos otros propósitos de los siete antes mencionados pero solo en casos donde la suposición de los componentes aceite y gas de los modelos de aceite negro sean inválidos.

Ejemplos de la aplicación de modelos composicionales abarcan:

1. Explotación del yacimiento de aceite volátil o gas y condensado donde la composición de los hidrocarburos y propiedades varían en forma significativa por debajo de la presión de burbujeo o punto de rocío.
2. Inyección de gas (seco o enriquecido) en un yacimiento de aceite para movilizar el aceite mediante la vaporización en la fase del gas móvil o por logro directo o por miscibilidad dinámica.
3. Inyección de  $\text{CO}_2$  en el yacimiento para movilizar el aceite, reducción de la viscosidad de aceite y la expansión del aceite.

Los simuladores composicionales han sido mejorados para estimar:

1. Pérdida de recuperación causada por el abandono de líquido durante la condensación retrograda del gas y la reducción de esta pérdida por reinyección de gas desde las instalaciones superficiales parcial o total.
2. Efectos del nivel de presión, composición de gas inyectado, inyección de  $\text{CO}_2$  o  $\text{N}_2$  en la recuperación de aceite por vaporización o miscibilidad.

Los modelos térmicos se han aplicado en estudios de yacimientos con métodos de combustión in situ y se han usado para simular la inyección cíclica y continua de vapor. En la inyección continua de vapor la atención se dirige a los efectos de la calidad de vapor y a la velocidad de inyección, la presión de operación y la inclusión de gas a la inyección de vapor. En la inyección continua de vapor concierne los periodos de tiempo óptimos por ciclo de inyección, de transferencia de calor y de producción.

La simulación numérica ha sido utilizada para estimar el desempeño de la inyección de químicos en el yacimiento donde los procesos son muy complicados y muchos parámetros del yacimiento afectan los resultados. La simulación de inyección de químicos ha sido utilizada para construir algoritmos para la selección del yacimiento apropiado para la inyección de miscelares y polímeros.

En resumen la simulación ha sido usada cada vez más para estimar y comparar recuperaciones bajo mecanismos de recuperación mejorada, tal como inyección de  $\text{CO}_2$ , métodos térmicos (inyección de vapor y combustión in situ) y varios tipos de inyección de químicos (aunque estos últimos no son económicamente aplicables).

El número de bloques y los resultados del gasto de cómputo son inferiores donde el ingeniero puede justificar el uso de elementos representativos del total del campo como base del modelo de estudio. Esto quizá es posible en yacimientos desarrollados donde se repiten los patrones del pozo, para cualquier proceso de recuperación (inyección de agua, inyección de  $\text{CO}_2$ , inyección de vapor, etc.). En tal caso, el elemento representativo ideal debe ser un elemento simétrico del yacimiento. En términos estrictos, este requiere:

1. Un repetido, patrón regular de terminaciones idénticas y pozos operando
2. Una formación areal homogénea de espesor uniforme
3. Distribución areal uniforme de la saturación inicial de fluidos

El número total de bloques de la malla son el producto del número areal de bloques,  $N_x N_y$ , por el número de capas,  $N_z$ . Diferentes consideraciones entran dentro de esa selección de dos números de espaciamento.

Los factores que indican la necesidad de una malla fina son la alta densidad de pozos y los cambios bruscos (areales) en la permeabilidad, porosidad, espesor y pendiente. Así como la dispersión numérica inherente a la simulación numérica. Ya que esos factores varían frecuentemente en el campo, el espaciamento en la dirección "x" y "y" de la malla muchas veces son no uniformes. El espaciamento de la malla se incrementa hacia los límites inferiores del yacimiento y la distancia se incrementa grandemente en el acuífero si este es incluido en la malla.

En general, el número de bloques areales requeridos se incrementa con el tamaño del yacimiento y el número de pozos. Sin embargo, el espaciamento de la malla

oscila entre una malla muy fina a una muy tosca, adecuada para diferentes yacimientos de tamaño comparable. El número más pequeño de bloques areales se asocian con estudios limitados del yacimiento de explotación natural e inyección de flanco de gas o agua.

Los factores que más afectan el número de capas de la maya (bloques verticales) requerida son las formaciones estratificadas, la comunicación vertical y el espesor total. La necesidad de subdividir las capas de una formación en dos o más capas depende del espesor de la capa y las características de segregación del fluido en los proceso de recuperación.

## 2. PARTICIÓN DEL ESPACIO

### 2.1 Celdas y pasos de tiempo

Excepto para casos muy simples, las ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo de fluidos en un yacimiento no puede resolverse en forma analítica. La solución numérica si es posible, por ejemplo, reemplazando las ecuaciones diferenciales con ecuaciones en diferencias.

El proceso de subdividir la distancia y el tiempo en intervalos definidos se conoce como discretización y está involucrado en las ecuaciones en diferencias.

Para utilizar ecuaciones en diferencias debe tratarse al yacimiento como si estuviese formado por elementos de volumen y calcularse, dentro de cada elemento los cambios en las condiciones de presión y saturación en cada uno de los intervalos de tiempo de la simulación numérica de un yacimiento.

Se conoce como celda a cada elemento de volumen que forma al yacimiento y paso de tiempo a cada intervalo de tiempo.

Una celda tiene un solo valor de saturación de agua, de aceite y de gas, de igual manera, cualquier propiedad que dependa de la saturación. Para representar las variaciones en las propiedades del yacimiento, las propiedades de las celdas deben cambiar de una celda a otra.

Los cambios de las propiedades entre celdas vecinas son función del tamaño de bloque a mayor número de bloques más gradual es el cambio de propiedades. La precisión con la que un yacimiento puede describirse en un modelo, así como la exactitud de los resultados del estudio depende del número de celdas utilizadas en el modelo. En la práctica anteriormente, el número de celdas se limitaba principalmente por el costo del cálculo y el tiempo disponible.

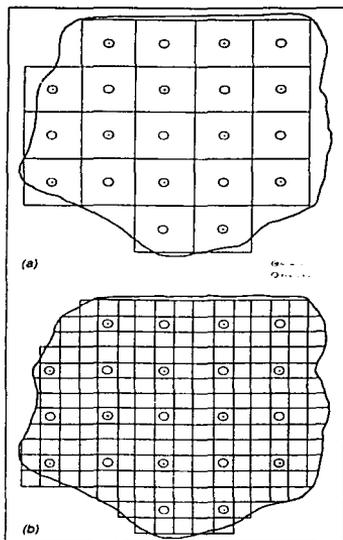


Figura 2.1 Ejemplo de una malla, a) identificar localizaciones, b) proveer adecuada segmentación para la simulación. <sup>2</sup>

Actualmente existen equipos de cómputo de alto rendimiento (cluster) a precios muy accesibles que permiten realizar cualquier tipo de análisis de sensibilidad. La principal limitante es el tiempo que dure el proyecto (la entrega de resultados oportunos).

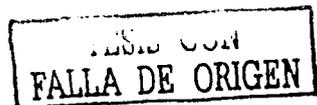
Como consecuencia de esto debe de hacerse una selección cuidadosa del tamaño y la complejidad del modelo. Este debe de contener suficientes celdas para simular el comportamiento adecuadamente, pero además debe de ser lo más simple y pequeño posible.

## 2.2 Consecuencias de la discretización

La falta de definición dentro de una celda y los cambios bruscos en la saturación o presión entre celdas puede crear problemas severos que deben ser manejados apropiadamente.

### 2.2.1 Representación de los pozos

La presión y saturación de la celda es aplicable al volumen completo de la celda. Excepto en casos especiales cada celda representa un área grande, como consecuencia la saturación y presión de la celda no será representativa de la saturación y la presión en la cara de la formación de un pozo fluyente. Una forma de resolver esto es mediante un modelo de un pozo con un mallado fino que modela el comportamiento en la región cercana al pozo. El comportamiento estimado del modelo es correlacionado con la celda a las condiciones apropiadas usando funciones.



### 2.2.2 Ponderación de la Movilidad

En el caso de un desplazamiento de aceite por agua para evaluar el flujo de aceite de una celda a otra, se debe asignar valores de movilidad de agua y aceite en la frontera entre las celdas. Puesto que la movilidad de una fase es función de la saturación, y que esta varía de un bloque a otro, en ocasiones de manera importante, se requiere escoger un solo valor de saturación para calcular la movilidad de los fluidos en la frontera entre los bloques.

De los procedimientos que se han utilizado para definir un solo valor de saturación para evaluar el flujo entre dos celdas los más confiables son:

- Ponderación corriente arriba. En este método la movilidad en la frontera entre dos celdas se iguala a la movilidad de la celda de donde procede el flujo.
- Interpolación o extrapolación. Se consideran dos o más celdas vecinas para estimar un valor de saturación para la frontera entre los bloques por interpolación o por extrapolación. No es utilizado frecuentemente en la actualidad.

### 2.2.3 Dispersión Numérica

La dispersión numérica, que es una consecuencia de las técnicas de análisis numérico, causa severas distorsiones en los procesos de simulación donde ocurren cambios rápidos en la saturación. Por ejemplo en muchos tipos de desplazamientos.

No existe un método satisfactorio para eliminar por completo la dispersión numérica en una simulación; pero sí se puede atenuar. Aunque no era muy práctico, por el

costo y el tiempo, la utilización de un gran número de celdas reduce la dispersión a un nivel aceptable. Actualmente es posible realizar un estudio de simulación con un gran número de celdas (aproximadamente  $1 \times 10^6$ ).

#### *2.2.4 Efecto de la orientación de la malla*

En modelos de dos y tres dimensiones, la dispersión numérica genera diferencias en las predicciones dependiendo de la posición de la malla con relación a los pozos inyectores y productores. Los efectos de orientación de la malla no son importantes excepto en simulaciones en donde la fase desplazante es mucho más móvil que la fase desplazada (como en la inyección de vapor en aceites pesados).

Los efectos de la orientación de la malla son importantes en desplazamientos de aceite por gas, desplazamientos miscibles y en desplazamiento de aceite por vapor.

#### *2.2.5 Ortogonalidad de la malla*

Las ecuaciones que se utilizan en la simulación de yacimientos fueron creadas para sistemas ortogonales. Si las celdas no son ortogonales entre sí las ecuaciones no son estrictamente aplicables y las soluciones generadas por el simulador pueden ser erróneas. En ciertos casos se puede tener una malla ligeramente no ortogonal, cuyos resultados son aceptables.

### **2.3 Criterios para la selección del tamaño de la celda**

El tamaño de las celdas debe ser lo suficientemente pequeño para satisfacer seis requerimientos:

1. Definir la saturación y la presión en los lugares requeridos por el estudio.
2. Representar apropiadamente la geometría, la geología y las propiedades físicas iniciales del yacimiento.
3. Describir los cambios de saturación y de presión con el detalle suficiente para cumplir los objetivos del estudio.
4. Modelar convenientemente la mecánica de flujo del yacimiento.
5. Ser compatible con las matemáticas de las diversas partes del simulador para contribuir a que la solución de la ecuación de flujo de fluidos sea exacta y estable.
6. Cuando se este considerando flujo composicional, describir los cambios de la composición con el detalle suficiente para cumplir con los objetivos del estudio (principalmente en proceso de recuperación mejorada).

### **2.4 Selección del tamaño de la celda**

Un modelo del yacimiento debe simular el comportamiento futuro bajo una o más políticas de producción o de inyección. Entre los aspectos del comportamiento que más importa conocer con precisión puede mencionarse a la productividad del pozo, la saturación de fluidos en la vecindad de los pozos, la RGA, la RAA, la eficiencia de desplazamiento y la eficiencia de recuperación.

## **2.5 Lugares donde la presión y la saturación deben ser calculadas.**

Esto puede incluir la localización de todos los pozos perforados o por perforar o bien un subconjunto de ellos. Este primer paso define la partición mínima requerida aun cuando generalmente debe hacerse una segmentación más fina.

## **2.6 Representación de la geometría, geología y propiedades físicas**

La frontera externa del yacimiento es la característica geométrica más obvia que debe ser representada. En ocasiones el límite de la malla puede hacerse coincidir con el límite del yacimiento. En otros casos las celdas que caen fuera del yacimiento pueden ser declaradas como inactivas o se les asigna cero porosidad para desactivarlas.

Barreras internas como intercalaciones arcillosas, discontinuidades del yacimiento y fallas no conductivas y/o semi-impermeables que pueden afectar seriamente el movimiento de los fluidos deben representarse y son otra característica geométrica que influye en el tamaño de las celdas. En estos casos las fronteras entre los bloques, que son impermeables o semi-impermeables, se escogen de manera que coincidan con la trayectoria de las barreras. Cierta tipo de malla permite seguir con mucha aproximación la trayectoria de las barreras, como es la malla PEBI.

Cuando el yacimiento es muy estratificado, esto es que hay importantes cambios de permeabilidad y de porosidad, se requiere una partición fina en sentido vertical y se divide al yacimiento en capas. En algunos casos aun cuando el yacimiento sea casi homogéneo puede necesitarse una segmentación vertical para representar los cambios de saturación y de presión.

En zonas de transición puede necesitarse una división más fina para representar la distribución de saturación, los gradientes de presión y las eficiencias de desplazamiento.

Si el yacimiento presenta cambios en las propiedades del aceite como viscosidad, presión de burbuja, relación gas disuelto en el aceite es necesario una malla más fina para representar tales variaciones. De igual manera los cambios de composición en un casquete de gas o en un yacimiento de gas imponen el uso de una malla lo suficientemente fina para describir la estratificación de los componentes.

### **2.7 Distribución de la saturación y la presión en el yacimiento en el tiempo.**

La distribución de la presión y de las saturaciones en el yacimiento y su evolución en el tiempo es un tema de importancia que debe considerarse al decidir las dimensiones de las celdas. La resolución areal y vertical de la malla tiene que ver con esa distribución.

Un modelo del yacimiento se considera eficiente si puede describir la distribución de la presión en el yacimiento a cada paso de tiempo, si puede calcular el comportamiento de las saturaciones de las fases y puede representar con precisión los pozos productores o inyectoros.

### **2.8 Cálculo de presión y producción de pozos en relación con el tamaño de la celda.**

En algunas regiones del yacimiento como acuíferos o casquetes de gas la malla puede ser de bloques bastante grandes aun cuando en el acuífero haya pozos inyectoros de agua.

En zonas de aceite es necesario una malla más fina aun cuando solo exista una fase fluendo. Esto se debe a que se requiere modelar el comportamiento de pozos productores individualmente y considerar el intervalo disparado en la celda o celdas que estén a la profundidad de este intervalo.

En zonas del yacimiento en que varias fases fluyen simultáneamente es necesario usar una malla fina para representar apropiadamente los cambios de saturación y de presión que están estrechamente relacionados.

Staggs y Herbeck<sup>3</sup> estudiaron los efectos del tamaño de la celda en la predicción del gasto. Usaron un modelo de dos fases de aceite negro. La única diferencia entre las diferentes corridas fue el número areal de las celdas (3x3, 4x4, 5x5, 6x6). En la Figura 2.2 se muestra el comportamiento de los cuatro casos, el tiempo de simulación fue de 7 años con el mismo gasto de inyección para los cuatro casos. Se observa que el mejor comportamiento fue el de la malla de 6x6.

Después de la inyección, el yacimiento había estado produciendo por una solución de gas y una saturación de gas se había establecido.

Se ha demostrado que el tamaño de las celdas influye de manera relevante en el cálculo del comportamiento de pozos inyectores y productores y que es conveniente ubicar, al menos, dos celdas intermedias entre la celda que contiene a un pozo productor y la de un inyector.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

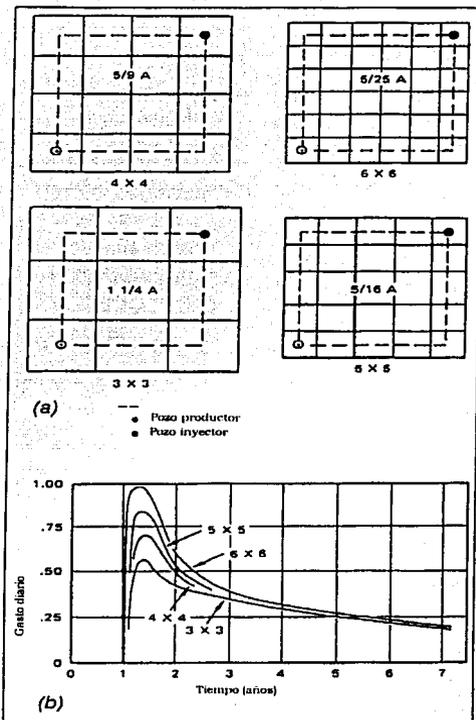


Figura 2.2 Influencia del espaciamiento de la malla en el desempeño de predicciones: a) modelo utilizado para estudiar los efectos del espaciamiento, b) gastos predichos por los modelos<sup>2</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.9 Tamaño de la celda y cálculo de la eficiencia de desplazamiento.

Como consecuencia de la discretización del espacio y del tiempo y de la necesaria ponderación de la movilidad en la frontera entre dos bloques, en un desplazamiento de aceite por agua por ejemplo, algo del desplazante pasará de uno a otro bloque independientemente del tamaño del paso de tiempo y del tamaño de las celdas.

Esto es la dispersión numérica que distorsiona el frente de desplazamiento y produce errores en la recuperación calculada de aceite. Tanto la segmentación vertical como la areal tienen influencia sobre la recuperación calculada.

### 2.9.1 Segmentación areal.

En la Figura 2.3 se compara la solución analítica, de Buckley-Leverett, de un desplazamiento de aceite con agua con los perfiles de saturación de agua calculados por un simulador. Se observa que a medida que el tamaño de la celda disminuye la solución numérica se aproxima a la analítica. El efecto de la dispersión numérica es disminuir la eficiencia de desplazamiento al tiempo de la surgencia en casos en que la relación de movilidades es favorable. Cuando la relación de movilidades es desfavorable hay una sobrevaluación de la recuperación cuando las celdas son grandes. En la figura 2.3 se observa que la relación de movilidades es favorable debido a que la malla con mayor número de celdas se aproxima a la solución analítica.

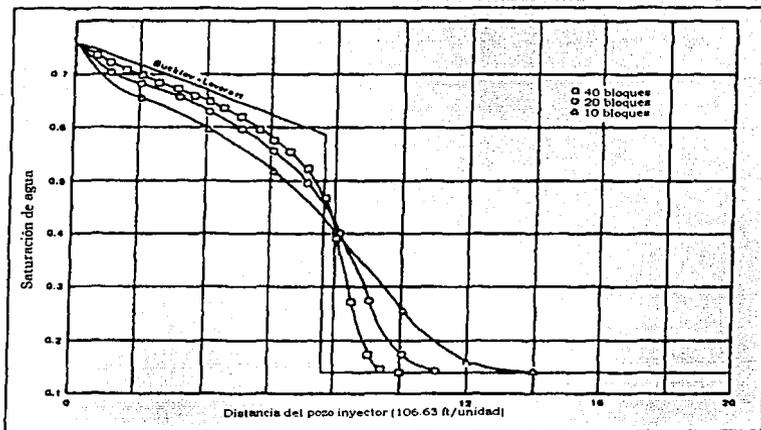


Figura 2.3 Influencia del espaciamiento de la malla en el cálculo de la distribución de saturación en un modelo lineal.<sup>2</sup>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.9.2 Segmentación vertical.

Si no hay una apropiada segmentación en sentido vertical el modelo del yacimiento no puede representar adecuadamente los perfiles de saturación derivados de la segregación gravitacional de las fases. Esto es particularmente cierto cuando se modela un yacimiento de alta permeabilidad vertical. Las digitaciones viscosas en desplazamientos; miscibles o inmiscibles, la formación de un casquete de gas, la segregación gravitacional de aceite y gas en un yacimiento de alta permeabilidad son algunos casos en que se debe considerar el uso de una partición más fina del espacio en sentido vertical. En la Figura 2.4 se observa que el frente de desplazamiento ha avanzado más en la sección cruzada que tiene menor número de celdas.

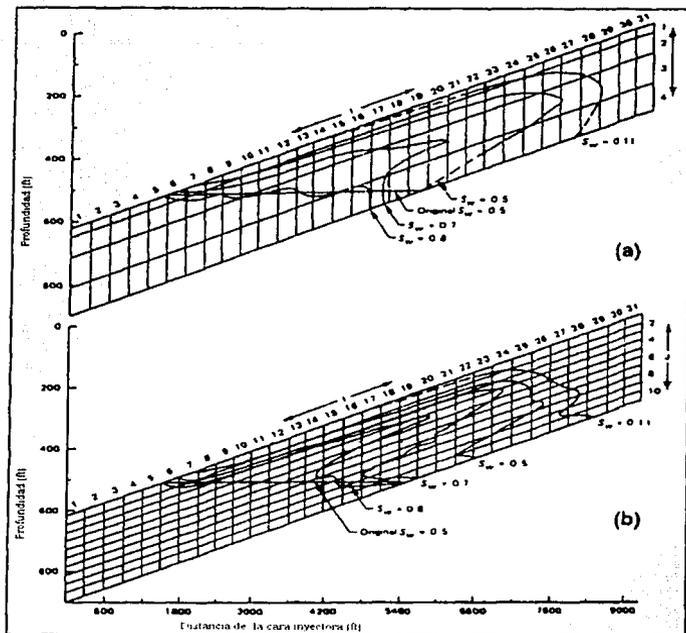


Figura 2.4 Influencia del espaciamento vertical en un modelo de sección cruzada. Los cálculos de la distribución de saturación se realizan por medio de un modelo de inyección de agua por flancos teniendo: a) 4 capas verticales, b) 10 capas verticales.<sup>2</sup>

1985 VOL 4  
FALLA DE ORIGEN

### 3. DIVERSOS TIPOS DE MALLAS

#### 3.1 Cartesianas

Se utilizan diversas técnicas numéricas para resolver las ecuaciones de flujo. El método más popular utilizado en la industria petrolera es el método de diferencias finitas.

El método consiste en la superposición de una malla de diferencias finitas en el yacimiento modelado. La malla seleccionada entonces es utilizada para aproximar las derivadas parciales de las ecuaciones continuas. Estas aproximaciones se obtienen por medio del truncamiento de la expansión de la serie de Taylor de tal manera que los términos de flujo de la ecuación diferencial se aproximen mediante diferencias centrales y los términos de acumulación de la ecuación diferencial se aproxime mediante diferencias regresivas en tiempo.

Existen varios tipos de mallas cartesianas utilizadas en la simulación de yacimientos: nodo centrado, nodo distribuido y una combinación de ellas. Aunque en este trabajo estas mallas se mencionen en relación a sistemas de coordenadas cartesianas, también son igualmente aplicables en coordenadas cilíndricas, esféricas o elípticas.

En la malla de nodo centrado, las celdas con dimensiones conocidas son sobrepuestas en el yacimiento. Para un sistema cartesiano, los nodos son definidos como centros de la celda. En una malla con punto distribuido, los nodos son distribuidos en el yacimiento antes de que los límites de las celdas sean definidos.

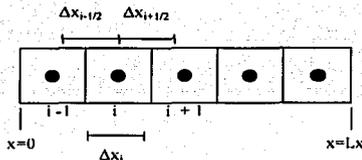
Para una malla rectangular la frontera entre las celdas es colocada entre dos puntos adyacentes de presión: los nodos. Históricamente, la simulación de yacimientos ha utilizado las diferencias finitas con bloques centrados porque los volúmenes asociados con cada punto representativo están claramente definidos y porque en forma natural modela mejor un yacimiento cerrado.

El propósito de la malla es la partición del yacimiento en celdas, en las cuales las propiedades representativas de las rocas pueden ser asignadas. Por esta razón, las celdas deben ser lo suficientemente pequeñas para describir la heterogeneidad natural del yacimiento y permitir promediar las propiedades de las celdas para representar adecuadamente el comportamiento del flujo en el yacimiento. Sin embargo, esto no siempre se logra porque los esfuerzos computacionales requeridos para la simulación están directamente relacionados con el número de celdas utilizadas en el estudio.

La malla de punto distribuido modela en forma natural una frontera a presión constante.

### 3.1.1 Malla con nodo centrado

Para flujo en la dirección  $x$ , una malla con nodo centrado se puede construir de la siguiente forma:



En esta figura, la malla consiste en  $n_x$  celdas sobrepuestas en el yacimiento. Estas celdas tienen predeterminada la dimensión  $\Delta x_i$  que no es necesario que sea igual. Estas celdas deben satisfacer la relación:

$$\sum_{i=1}^{n_x} \Delta x_i = L_x \dots\dots\dots(3.1)$$

En otras palabras, las celdas deben medir la longitud de  $L_x$  del yacimiento en la dirección de interés. Esta incluye a la zona de hidrocarburos como algún acuífero asociado y permite modelar en forma natural el cierre del yacimiento (fronteras de tipo Newman).

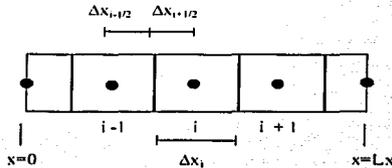
Una vez que las celdas son definidas, los nodos son colocados en el interior de la celda donde las presiones son calculadas. Para un sistema rectangular los nodos son colocados en el centro de las celdas, mientras que los nodos son espaciados logarítmicamente para una malla cilíndrica. Los límites de la celda se designan como  $x_{i-1/2}$  y  $x_{i+1/2}$ , mientras que el centro de la celda se designa como  $x_i$ . Las propiedades de esa celda considerando un sistema rectangular se interrelacionan a través de las expresiones:

$$x_i = (x_{i-1/2} + x_{i+1/2})/2 \dots\dots\dots(3.2 a)$$

$$\Delta x_i = x_{i+1/2} - x_{i-1/2} \dots\dots\dots(3.2 b)$$

### 3.1.2 Malla con nodo distribuido

Para flujo en la dirección x la malla de punto distribuido se puede construir de la siguiente manera:



Los nodos son colocados en el límite del yacimiento y en el interior. La longitud total de interés del yacimiento está dada por la distancia entre los nodos que se encuentran en el límite de la malla y en forma natural permiten especificar fronteras del tipo Dirichlett.

Para las mallas rectangulares, los límites de las celdas están colocadas en medio de dos nodos adyacentes, esto es:

$$x_{i+1/2} = (x_{i+1} + x_i) / 2 \dots\dots\dots(3.3)$$

En una malla de punto distribuido, el límite izquierdo del primer bloque es por definición colocado sobre el nodo de la celda, esto es:

$$x_{1/2} = x_1 \dots\dots\dots(3.4)$$



De forma similar el límite derecho de la última celda está colocada encima del nodo de la celda, esto es:

$$x_{nx+1/2} = x_{nx} \dots\dots\dots(3.5)$$

Las dimensiones de la celda pueden ser calculadas para los límites como:

$$\Delta x_j = x_{i+1/2} - x_{i-1/2} \dots\dots\dots(3.6)$$

En las mallas de nodo centrado el volumen de las celdas que se encuentran en las fronteras es diferente del volumen de las celdas que se encuentran en el interior.

### 3.2 Geometrías de mallas areales

En la parte anterior se enfatizó el uso de una geometría rectangular, pero en la simulación se utilizan diversos tipos de mallas cuando los objetivos de la simulación requieren el uso de celdas con una mayor aproximación, o cuando se desea modelar exactamente la geometría del problema. El uso de geometrías especializadas requiere el uso correspondiente de ecuaciones diferenciales y su ecuación en diferencias finitas análogas para el estudio de la simulación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.2.1 Geometría en Coordenadas Rectangulares

La geometría en coordenadas rectangulares tiene muchas aplicaciones y es la más comúnmente utilizada en la simulación de yacimientos. Una malla rectangular puede ser utilizada para responder a las interrogantes que se relacionan con el comportamiento de todo el yacimiento, el comportamiento de pozos individuales, y el comportamiento de secciones entre pozos.

Las mallas con geometría rectangular son generalmente usadas debido a que son lo suficientemente flexibles para ajustarse a cualquier geometría de un yacimiento.

El espaciamiento de la malla para simular un yacimiento completo puede ser no uniforme. Generalmente se utiliza una malla fina en áreas de interés, tal como una región impregnada de hidrocarburos; mientras se usa malla menos fina en los acuíferos asociados. La Figura 3.1 muestra una vista areal de un yacimiento, el cual tiene sobrepuesto una malla cartesiana, mostrando las celdas activas e inactivas.

Las mallas rectangulares son utilizadas para modelar los patrones de flujo en inyección de fluidos por patrones. Cuando se está modelando un patrón de pozos con un simulador de yacimientos, la simetría se utiliza generalmente para reducir el número de celdas requeridas para modelar el desplazamiento adecuadamente. Por lo general, las mallas con espaciamiento uniforme son utilizadas para estudios de patrones.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

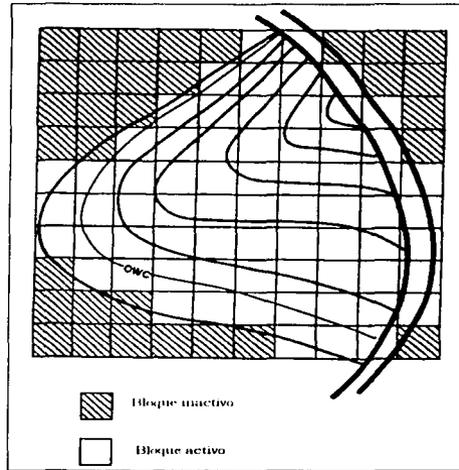


Figura 3.1 Malla de bloque centrada sobre un yacimiento de aceite. OWC, contacto agua-aceite.<sup>1</sup>

Las mallas rectangulares también son utilizadas en estudios de secciones transversales, los cuales se desarrollan para estudiar el comportamiento entre pozos para distintos pozos a lo largo de una sección. El objetivo del estudio de una sección transversal puede incluir los efectos de lutitas en los procesos de desplazamiento, determinar los efectos de detalles de la geología del yacimiento en el comportamiento del pozo. En la Figura 3.2 se observa una malla rectangular en una sección cruzada en donde se pretende conocer el comportamiento de dos pozos productores y un inyector.

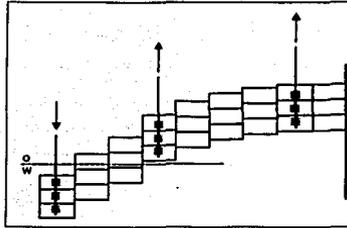


Figura 3.2 Figura típica de una malla rectangular utilizado en un estudio de sección cruzada<sup>1</sup>

### 3.2.2 Malla con Geometría Cilíndrica

Las mallas con geometría cilíndrica son utilizadas para estudios de pozos individuales. El objetivo de simular un pozo individual es el de predecir su comportamiento determinando los efectos de las estrategias de terminación y producción en una conificación de agua y/o gas, y la optimización de los intervalos de perforación.

Mientras la construcción de las celdas es relativamente arbitraria para una malla rectangular, la construcción de una malla con geometría cilíndrica sigue las siguientes reglas particulares:

1. Los nodos son espaciados en forma logarítmica a partir del agujero hacia afuera.

$$r_{i+1} = a_{lg} r_i \dots\dots\dots(3.7)$$

donde  $i = 1, 2, \dots, n-1$

2. Los límites de la celda para cálculos de flujo entre celdas están definidos por la ecuación.

$$r_{i+1/2} = \frac{r_{i+1} - r_i}{\log_e(r_{i+1}/r_i)} \dots\dots\dots(3.8)$$

donde  $i = 1, 2, \dots, n-1$

3. Los límites de la celda para cálculos volumétricos están definidos por la ecuación.

$$r_{i+1/2}^2 = \frac{r_{i+1}^2 - r_i^2}{\log_e(r_{i+1}^2/r_i^2)} \dots\dots\dots(3.9)$$

La relación espacial de ponderación ( $a_{lg}$ ) se puede calcular de la siguiente manera para una malla de nodo centrado:

$$a_{lg} = \left( \frac{r_c}{r_w} \right)^{1/n} \dots\dots\dots(3.10)$$

y para una malla de punto distribuido:

$$a_{lg} = \left( \frac{r_c}{r_w} \right)^{1/(n-1)} \dots\dots\dots(3.11)$$

Estas tres reglas se aplican para mallas con nodo centrado y nodo distribuido. La ecuación 3.7 se utiliza para mantener la caída de presión en todas las celdas aproximadamente igual. La ecuación 3.8 se utiliza para garantizar que el flujo calculado de una celda a otra celda por la ecuación de diferencias finitas es igual al calculado por la ecuación continua de la ley de Darcy. Y la ecuación 3.9 es utilizada para garantizar que el volumen de las celdas discretas son iguales al volumen de las celdas continuas. En la Figura 3.3 se muestra una malla cilíndrica.

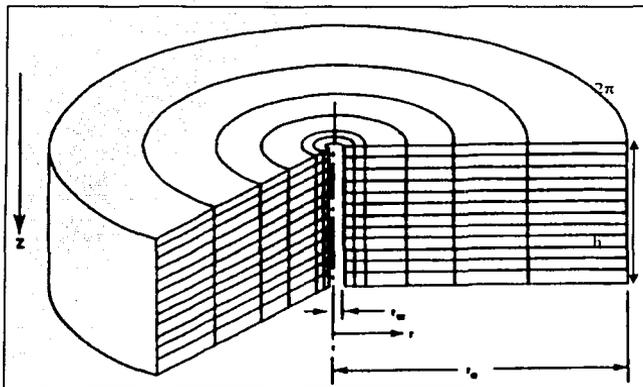


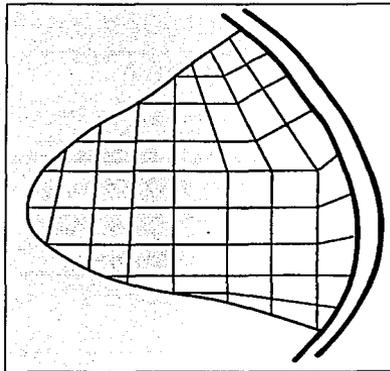
Figura 3.3 Malla cilíndrica en la vecindad del pozo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.2.3 Malla con Geometría de Punto-Esquina

Las mallas con geometría de punto esquina utilizan polígonos como celdas, y las celdas están definidas para especificar las esquinas de los polígonos. Las propiedades de las celdas, tal como los centros de la malla, espesores y transmisibilidades son determinados con base en las esquinas de las celdas.

La geometría de punto esquina puede ser utilizada para múltiples aplicaciones; sin embargo, es principalmente utilizada para yacimientos altamente afallados. Para estos yacimientos, los bordes de los polígonos pueden ser colocados en las fallas.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.4 Malla con geometría de punto esquina sobre un yacimiento de aceite<sup>1</sup>.

La descripción de la falla generalmente es mejor con el uso de la geometría de punto esquina que la descripción obtenida de una geometría rectangular. Una característica perjudicial del uso de la geometría de punto esquina es que los

resultados del sistema no son ortogonales. El uso de una malla no ortogonal con esquema estándar de siete puntos puede dar como resultado errores importantes por la exclusión de los términos de derivadas cruzadas. Este problema puede ser resuelto, en parte, por medio del uso de aproximaciones de diferencias finitas de mayor orden. La Figura 3.4 muestra una malla con geometría punto esquina.

### 3.3 Refinamientos Locales y Mallas Híbridas

La malla de refinamiento local utiliza una malla secundaria, fina, incrustada en la malla principal gruesa, debido a esto el tiempo de cómputo se incrementa en una simulación. Estas mallas son utilizadas cuando se requiere tener un estudio más detallado de ciertas regiones del yacimiento; como ejemplo puede ser el comportamiento en la vecindad de un pozo por problemas de conificación. Cuando la malla secundaria utiliza una geometría diferente a la de la malla principal, el resultado es una malla híbrida. En la Figura 3.5 se muestra una malla híbrida formada por malla de geometría rectangular y una malla cilíndrica representando a los pozos. En esta figura se aprecia la utilidad de este tipo de mallas en pozos horizontales.

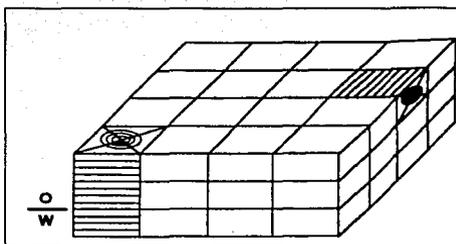


Figura 3.5 Malla híbrida para mejorar el acoplamiento de los pozos al modelo del yacimiento. O = aceite, W = agua.

Una malla híbrida también puede estar formada por una malla cartesiana y una malla PEBI como se muestra en la Figura 3.6.

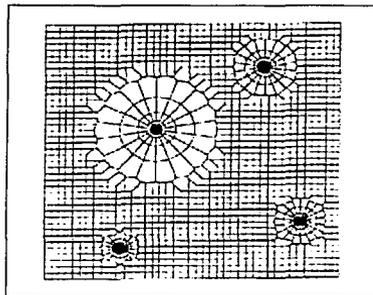


Figura 3.6 Malla híbrida formada por una malla cartesiana y una malla PEBI.<sup>4</sup>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.3.1 Mallas Curvilíneas Ortogonales

Esta técnica mejora el tratamiento de los pozos en la simulación de yacimientos por el uso de la malla curvilínea ortogonal en las regiones del pozo y malla rectangular en las partes del yacimiento restantes.

El tratamiento de los pozos en la simulación de yacimientos puede tener una fuerte influencia en los resultados de cómputo. El fin es relacionar la presión del pozo y la

presión del yacimiento por medio de modelos de flujo en una sola fase en la región del pozo.

Peaceman<sup>14</sup> mostró que en una celda cuadrada, la distribución de presión obtenida por el estado fijo radial iguala la presión de la celda del pozo como un radio equivalente de  $r_e = 0.2\Delta x$ . Con este concepto de radio equivalente, una relación entre la presión del pozo fluyendo y la presión del pozo puede obtenerse fácilmente. Esta aproximación ha sido extendida a pozos en el centro de las celdas rectangulares y en pozos no centrados. Estrictamente hablando, estos modelos de pozos son inválidos cuando en la vecindad del pozo con altos rangos de saturación ocurren cambios bruscos. Un manejo inadecuado de la movilidad de la fase acarrea un error en el cálculo de WOR y GOR. Además el uso de celdas cartesianas en cualquier parte del yacimiento no permite realizar una simulación real de la geometría en la cercanía del pozo.

La necesidad de representar en forma exacta y simple a los pozos en la simulación de yacimientos ha encaminado a desarrollar aproximaciones con mallas híbridas.

En esta técnica, una malla cartesiana es utilizada para representar el yacimiento y otra malla fina curvilínea ortogonal para regiones de pozos que puede comprender uno o más bloques de la malla cartesiana. La solución para varias regiones puede ser separada de tal manera que los diferentes niveles de carácter implícito en el tratamiento de las trasmisibilidades pueda ser considerado. Además, el problema de la región del pozo puede ser resuelto en 1, 2 o 3D, como sea requerido.

Actualmente es posible resolver en forma simultánea varias regiones: malla híbrida, tomando en cuenta la formulación totalmente implícita, sin necesidad de resolver en forma separada dichas regiones.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.4 Mallas de Geometría Vertical

En los párrafos anteriores, de las geometrías areales, no se mencionó la malla vertical o de capas. Tres tipos de capas pueden ser utilizadas en las mallas areales discutidas en la sección previa: estratigráficas, proporcionales y tipo tanque.

Las capas estratigráficas, como su nombre lo dice, siguen la estratificación natural del yacimiento. Las capas estratigráficas son utilizadas para incorporar información geológica en el modelo del yacimiento. Esta es la malla más comúnmente utilizada para la simulación de todo el yacimiento.

Las capas proporcionales, como su nombre lo dice mantienen la proporción constante entre dos planos.

La capa tipo tanque, utiliza un sistema de celdas horizontales, siempre con la presencia de pendientes o características estructurales. La capa tipo tanque está limitada a la simulación de todo el yacimiento, pero puede ser utilizada en un modelo radial del flujo hacia un pozo.

#### 3.4.1 Mallas curvilíneas ortogonales (mallas elípticas)

El sistema de curvas suaves coordinadas es un método que fue desarrollado para la generación de una malla que se ajuste a los límites exteriores, es ortogonal, y se ajusta a los límites interiores del yacimiento. El procedimiento está basado en la teoría del "cuasi ajuste elíptico", y es hecho prácticamente a través de una extensión de la forma parabólica.

Comúnmente en los estudios de yacimiento se necesita escoger una malla apropiada curvilínea, para discretizar las ecuaciones de flujo del yacimiento. Algunas características de estas mallas son:

1. La malla se ajusta a las formas de los límites exteriores.
2. La malla se ajusta a los límites interiores de cualquier geometría.
3. Las mallas son ortogonales.
4. Las mallas son planas.
5. Las mallas conservan la estructura de los datos de la lógica cartesiana.
6. El procedimiento de generación de la malla requiere de códigos mínimos de interrupción y su manejo es amigable.<sup>5</sup>

Los beneficios del sistema curvilíneo coordinado de modelar fallas, es de gran importancia para la simulación del campo. Posee la capacidad de modelar geometrías en forma exacta de formas físicas complejas, tal como el límite del yacimiento, fallas internas y sistemas de fracturas, estratificaciones y varias geometrías de pozos. Hay una importante ventaja debido a la eliminación de celdas inactivas y la preservación de los coeficientes de la matriz en la solución lineal. En la Figura 3.7 se observa una malla curvilínea ortogonal.

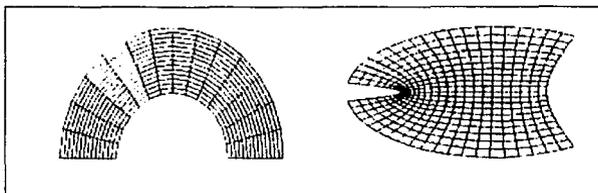


Figura 3.7 Malla curvilínea ortogonal<sup>6</sup>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.4.2 Mallas irregulares

Muchos aspectos deben ser considerados durante el desarrollo de una metodología para la construcción práctica de una malla de un yacimiento. Los requerimientos pueden ser clasificados en tres grupos:

1. Minimizar el error de discretización en las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos en un medio poroso.
2. Maximizar la eficiencia de cómputo en la solución.
3. Proveer de una solución correcta para cualquier problema relevante.

Los estudios de simulación a escala de yacimiento comúnmente se realizan con mallas cartesianas y mallas de punto esquina. Ambas tienen ventajas y desventajas y ambas han sido extensamente utilizadas por mucho tiempo.

Las mallas cartesianas satisfacen el primer requerimiento más que otros tipos de mallas, pero las mallas de punto esquina son más flexibles para la descripción geométrica real del yacimiento. Muchas mejoras se han sugerido para ambas mallas, pero siempre sacrificando la eficiencia de cómputo y generalmente la facilidad de aplicación.

Basados en experiencias prácticas y consideraciones teóricas fueron desarrollados los siguientes conceptos que soportan la metodología para la construcción de mallas irregulares para la simulación de yacimientos petroleros:

#### 1. Todas las celdas son construidas con el método de Bisección Perpendicular (PEBI).

Desde el punto de vista teórico las mallas ortogonales (estructuradas) son las más exactas para la discretización con el método de Bisección Perpendicular PEBI (no estructurada). Dependiendo de la distribución de los puntos de la malla, este método puede dar una malla cartesiana así como una malla

completamente irregular. El principio y el algoritmo es el mismo para los casos de dos y tres dimensiones. Los casos anisotrópicos, con el tensor completo de permeabilidad, pueden ser modelados. La malla es fácilmente comprendida por los ingenieros. En la Figura 3.8 se observa una malla PEBI, en donde existe una barrera al flujo entre dos pozos, en la parte inferior izquierda se encuentra un pozo inyector y en la parte opuesta un pozo productor.

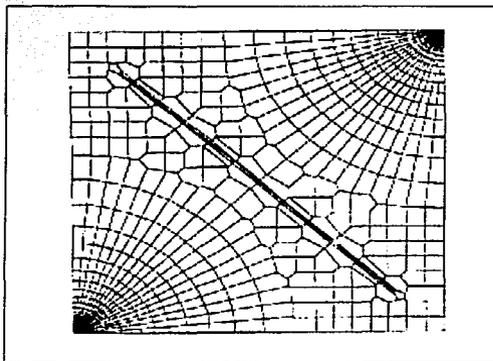


Figura 3.8 Malla PEBI en la que se modela una barrera al flujo entre dos pozos.<sup>4</sup>

## 2. Tres clases de mallas independientes pueden ser construidas.

Comúnmente, una malla que abarca el yacimiento y el acuífero es construida para un proyecto de simulación. Satisfaciendo la necesidad enfocada en un área específica. En esta metodología se definen tres clases de mallas independientes para un modelo completo del yacimiento. Estas son las mallas para las áreas productivas, acuíferos y ventanas, como a continuación se describen.

El **área productiva (AP)** es el área de mayor interés y operación. Esta abarca la acumulación de hidrocarburos y sus alrededores inmediatos. Esto asume que no hay pozos perforados afuera de las áreas productivas, excepto de los de inyección de agua y de observación.

El **acuifero** está definido como el área exterior del área productiva. El acuifero solo es utilizado para el mantenimiento de la presión. Todos los detalles que se saben acerca del acuifero que rodea al AP pueden estar dentro del AP de tal manera que se pueda modelar con la malla apropiada.

Una **ventana** es un subdominio arbitrario de la malla básica del AP. En el plano horizontal está limitado por las caras de las celdas en el límite de la ventana y pueden ser rectangulares o de cualquier otra forma. La geometría dentro de una ventana puede ser diferente de la parte de la malla subyacente. Solo los puntos frontera de la malla y el límite mismo deben corresponder a la parte fundamental de la malla.<sup>7</sup> En la Figura 3.9 se observan los tres tipos de mallas mencionados anteriormente.

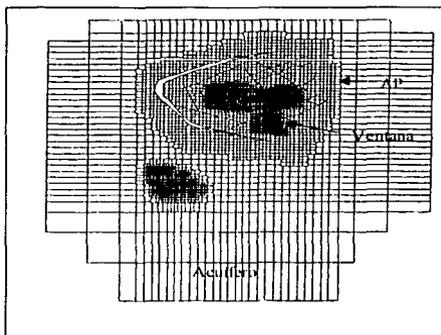


Figura 3.9 Malla PEBI, mostrando el AP, acuifero y la ventana<sup>7</sup>

### 3. Las mallas cartesianas pueden ser utilizadas en el AP y en el acuífero

No hay razón para utilizar la más complicada y menos exacta malla de punto esquina porque las fallas y otras discontinuidades pueden ser modeladas de forma más exacta. La mayor ventaja de la malla cartesiana es que la localización de los puntos de la malla no cambiarán si las trayectorias de las fallas cambian o si nuevas fallas son introducidas. Si hay una necesidad de utilizar mallas irregulares en una parte dada del AP, entonces se crea una ventana con una clara relación entre la malla cartesiana fundamental. En la Figura 3.10 se observa el modelado de varias fallas.

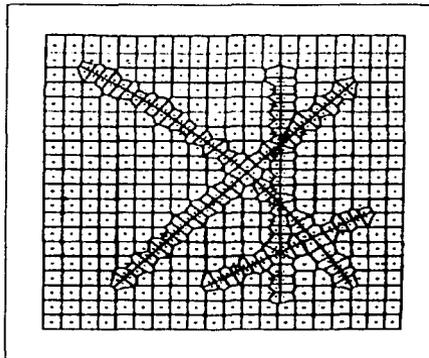


Figura 3.10 Malla PEBI en donde se modela una serie de fallas.\*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### **4. La dirección de las líneas de la malla debe ser paralela a las coordenadas cartográficas**

En este caso, la comparación con los mapas geológicos es sencilla. Una rotación o ajuste de las líneas de la malla a las fallas principales y a la frontera entre fases no es necesaria si esos límites son modelados. Una ventaja adicional es que los ingenieros no gastarán tiempo en la rotación y traslado de la malla se evita la subjetividad en la construcción de la malla<sup>7</sup>.

#### **5. La malla dentro del AP es cuadrada**

La malla cartesiana cuadrada es la malla más exacta. No hay argumentos razonables para emplear una malla irregular dentro del AP. Usando el método de falla y modelado del pozo, que más adelante se describen, no es necesario el ajuste del espaciamiento de la malla a unas líneas predeterminadas o a localizaciones de pozos o trayectorias de pozos horizontales. Naturalmente, el tamaño de la celda debe estar en relación a la densidad de los datos geológicos disponibles y el espaciamiento de los pozos, pero estos cambian muchas veces durante la vida del proyecto. En otras palabras, la malla no debe ser más fina que lo requerido para el modelado adecuado del comportamiento global del yacimiento. Desde este punto de vista, el tamaño correcto de la malla es independiente de cualquier propiedad local. Posteriormente, la técnica de refinamiento local puede utilizarse para reducir el tamaño de la malla<sup>7</sup>.

#### **6. Se usa refinamiento local en el AP**

Se debe enfatizar que esta clase de refinamiento no tiene nada en común con el refinamiento en una parte de la malla cartesiana o con el modelado de un sector. El refinamiento areal puede ser de 2x2, 4x4, 8x8, o de 3x3 y 6x6. La regla de transición es de 1:2 o 1:3 entre la malla gruesa y fina, y es satisfecha automáticamente por la extensión de la zona de refinamiento<sup>7</sup>.

**7. El espaciamiento de la malla se incrementa gradualmente en el acuífero.**

Esto se justifica ya que: solo una fase fluye en el acuífero, los parámetros del acuífero no se conocen bien y la distribución de la presión en esta área no es de mucha importancia.

**8. La estratificación es idéntica a las facies geológicas.**

El procedimiento para la construcción de la malla está basado en el modelo geológico del yacimiento. No es necesario para los geólogos estar pendientes de cómo se verá el modelo del yacimiento. El trabajo innecesario de estar volviendo a dibujando los mapas es eliminado. Tres opciones automáticas se utilizan para construir la estratificación óptima para la simulación numérica:

- a) Agrupación de estratos (cuando existe gran similitud entre estos).
- b) Refinamiento vertical
- c) Estratos faltantes

**9. Enlace entre el acuífero y el área productiva**

El enlace entre el modelo del acuífero y el área productiva es un paso posterior a la construcción de la malla. Diferentes modelos de acuíferos pueden ser enlazados al área productora sin la necesidad de reconstruir todo el modelo. Este enlace se efectúa mediante una malla irregular, de tal manera que apartir de una malla gruesa (acuífero), se pasa a una malla fina (Area productiva), pasando por una malla irregular, esto se puede observar en la Figura 3.9.

**10. Las fallas y la localización de los nodos son independientes.**

No es necesario cambiar las fallas o la posición de los nodos durante la construcción de las celdas. Las fallas podrán ser verticales o inclinadas y podrán cruzarse entre ellas o bifurcarse. Si se introducen después fallas adicionales o las trazas cambian, la malla solo cambiará localmente. Las fallas

podrán ser conductivas o no. Las fallas son modeladas con la malla PEBI, y estas describen la forma de la falla.

**11. La opción para establecer conexiones entre nodos no vecinos es innecesaria.**

Si las capas están ausentes o acuífadas en alguna parte del yacimiento, entonces las capas existentes son conectadas automáticamente en la dirección vertical. En las fallas las capas yuxtapuestas serán conectadas.

**12. Cualquier parte de la malla del área productora puede ser reemplazada por una ventana.**

Mallas separadas pueden ser construidas para cualquier área mayor de 2x2 celdas. Las ventanas pueden ser introducidas o retiradas a cualquier tiempo durante la construcción de la malla o durante la corrida del simulador.

**13. No hay límite para el tamaño de las celdas.**

La malla puede ser refinada en una cierta área sin ningún límite. Esto es realizado por la introducción de una ventana. El tamaño más pequeño posible de una celda podrá ser del tamaño del agujero mismo.

**14. En un momento dado la malla constituye un modelo integrado para la simulación**

La malla para un incremento de tiempo dado es una unidad integrada y las ecuaciones se resuelven simultáneamente. No hay refinamiento en alguna zona modelado de un sector o descomposición de dominio. La eficiencia computacional se garantiza por la formulación implícita de las ecuaciones, implícitud dinámica, incrementos de tiempo superpuestos para las ventanas y por la eficiencia de los métodos de solución de sistemas de ecuaciones de matrices irregulares. En la figura 3.11 se observa una malla PEBI con una serie de fallas, las cuales son definidas perfectamente por la malla irregular.

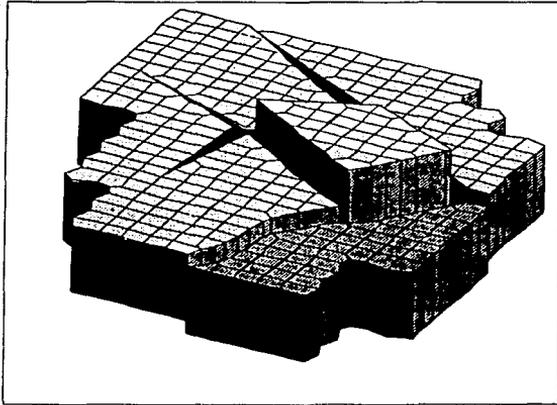


Figura 3.11 Malla irregular en 3D mostrando varias fallas.<sup>7</sup>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **4. CONSTRUCCIÓN DE MALLAS**

En este capítulo se muestra un ejemplo real de la construcción de una malla de un yacimiento ubicado en el sureste de México. Debido a que la información fue proporcionada por el IMP y esta es considerada confidencial, se prescindirá de mencionar su ubicación así como el nombre del mismo.

### **4.1 Antecedentes del Yacimiento en Estudio**

El campo fue estudiado en distintas ocasiones a través de un modelo estático geológico, con restricciones en su definición vertical y en las propiedades (falta de información en algunos estratos). El campo ha sido analizado mediante varios estudios de simulación, burdos y refinados, obteniendo aproximaciones diversas, que han tenido como problemática común el caer fácilmente en inestabilidad de solución. Utilizando y analizando parte de la información de esos modelos, se crearon distintos esquemas de simulación. El campo cuenta con 47 pozos.

#### **4.1.1 Características de la formación**

El estudio fue realizado tomando como base la información procesada de modelos existentes, consistentes en un modelo de caracterización y en un modelo de simulación.

#### *4.1.1.1 Estudio de caracterización*

Según la caracterización geológica la columna geológica esta constituida por el cretácico medio y cretácico inferior, el cretácico medio está integrado por tres unidades principales de flujo. La litología del Cretácico Medio Kma corresponde a una brecha calcárea dolomitizada o bien una brecha dolomítica o eventualmente pura dolomía, presentando persistentemente cavidades de disolución con un diámetro de 0.1 a 3.0 cm., la distribución de estas litologías es uniforme a excepción de las áreas cercanas a los pozos 51, 85 y 92 en las que se presentan intercalaciones horizontales de arcilla dolomitizada con escasas cavernas de disolución. La litología del Cretácico Medio Kmb esta constituida por brecha calcárea parcialmente dolomitizada con cavernas de disolución.

El Cretácico Medio Kmc presenta dos tipos de litología, una constituida por una brecha calcárea parcialmente dolomitizada y otra principalmente arcillosa dolomitizada. El Cretácico Inferior Ki esta constituido por una brecha calcárea dolomitizada con escasa impregnación de hidrocarburos, las cavidades de las porciones de dolomía son por disolución, también se detectaron intercalaciones laminadas de lutitas bentoníticas.

El yacimiento se considera como naturalmente fracturado, los vóculos encontrados fueron manejados como un sistema fallas permeables.

#### *4.1.1.2 Límites del yacimiento*

La producción del campo proviene básicamente de las unidades de KM(a), KM(b) y KM(c), incluidas en un sistema estratigráfico en el que las rocas carbonatadas fueron depositadas en un ambiente marino somero de poca circulación, cuya definición estructural fue dada por la actividad tectónica, junto con los contactos de agua aceite define los límites del yacimiento dividido en 3 grandes bloques, el

primero de ellos limitado al norte por una falla al oeste por el contacto agua-aceite a 4186 m.b.n.m. y al sureste con una falla semipermeable. El segundo bloque es el área de mayor producción, está limitada al noreste por una falla inversa, junto con los dos contactos a 4186 m.b.n.m. El bloque III es la porción sur y esta limitada por una falla hacia el este y por otra al oeste, hacia al sur por el contacto agua aceite a 4186 m.b.n.m. Los tres bloques fácilmente se aprecian en la Figura 4.2.

#### *4.1.1.3 Análisis de fluidos*

El modelo de fluidos PVT corresponde a un análisis para aceite negro con un factor de volumen de formación de 1.54 Bls c.y. / Bls c.s. a las condiciones iniciales de presión de 440 Kg. /cm<sup>2</sup>; una  $R_s$  a  $P_b$  de 1.1453 mcsf / stb, viscosidad de 0.1435 cp a  $c_y$  y 0.454 cp a  $c_s$ , la densidad a 0.8653 gr/cm<sup>3</sup> @  $c_s$  y 32 grados API. La presión del yacimiento se encuentra actualmente a 4608 psi

#### *4.1.1.4 Características de la malla*

Se construyó una malla fina de punto esquina de 34 x 36 x 8, asignado una capa para cada unidad de flujo kma, kmb, kmc y cinco más para la formación del cretácico inferior, cuyas dimensiones están estimadas con un espesor constante aproximado de 350 metros.

#### *4.1.1.5 Volumen original de hidrocarburos*

El volumen original de hidrocarburos es de  $1500 \times 10^6$  Bl@cy.

#### 4.1.1.6 Problemática del campo

El campo se encuentra afectado por un sistema complejo de fallas inversas, normales y laterales que podrían estar dividiendo al yacimiento en su comportamiento de flujo en tres regiones y en por lo menos 9 bloques de saltos. Además la mayor dificultad ha sido la falta de información de la formación del Cretácico inferior, que da como consecuencia una estimación errónea del comportamiento de producción del agua, así como del volumen original de hidrocarburos.

#### 4.2 Construcción gráfica de la malla

Este ejemplo pretende mostrar como es que se construye una malla en forma general mediante la utilización de un software gráfico y no pretende adentrarse al uso del paquete.

Se utilizó el software "Grid", ya que se encuentra disponible el uso de sus licencias en el IMP. En el proceso de la construcción se omiten algunos pasos como son los de edición, así como los que están relacionados directamente con el software.

Para construir la malla se requiere información geológica y petrofísica del yacimiento en estudio; que previamente geología proporciona al área de simulación, esta se entrega en forma de archivo de datos.

Los archivos entregados contienen información acerca de la profundidad de las cimas, los espesores de los estratos, la ubicación de los pozos, la ubicación de las fallas, la ubicación de los contactos, las propiedades petrofísicas de cada estrato (porosidad, saturación, permeabilidad, etc.) y cada uno de estos se encuentra en un archivo por separado.

- 1) El primer paso es crear un modelo en el cual se cargan paso a paso cada uno de los archivos de datos.
- 2) Se selecciona el tipo de proyección de mapas a utilizar, para este ejemplo seleccionamos (normal cartesian coordinates).
- 3) Se delimita el área geográfica del modelo y con este paso se concluye la creación del modelo.
- 4) Se carga al programa el mapa de cimas del yacimiento en estudio mostrado en la Figura 4.1

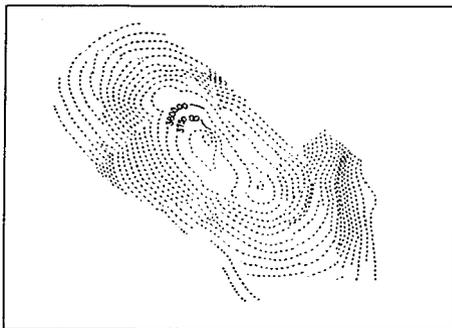


Figura 4.1 Mapa de cimas del yacimiento.

- 5) Se cargan al programa las fallas y se visualizan por encima de los contornos de las cimas antes cargadas, el modelo presenta 17 fallas. Ver Figura 4.2.
- 6) Se cargan al programa los pozos y se visualizan por encima de los contornos de las cimas y las fallas antes cargados, el yacimiento cuenta con 47 pozos. Ver Figura 4.3.

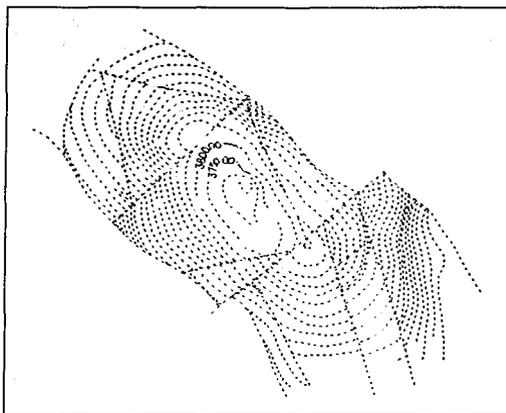


Figura 4.2 Mapa de cimas con el mapa de fallas.

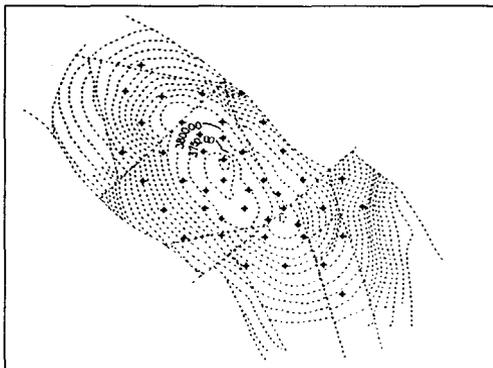


Figura 4.3 Mapa de cimas con sus fallas y pozos.

- 7) Se cargan al programa los contactos y se visualizan junto a los otros mapas cargados.
- 8) Se comienza la creación de la malla, para esto primero se definen las unidades a utilizar, y posteriormente se delimita el área de la malla y se le asigna un nombre a la malla.
- 9) Se selecciona el tipo de malla a utilizar, para este ejemplo se utilizará una malla de punto esquina de 34 x 36 en sentido areal. El programa construye automáticamente las celdas. Ver Figura 4.4.

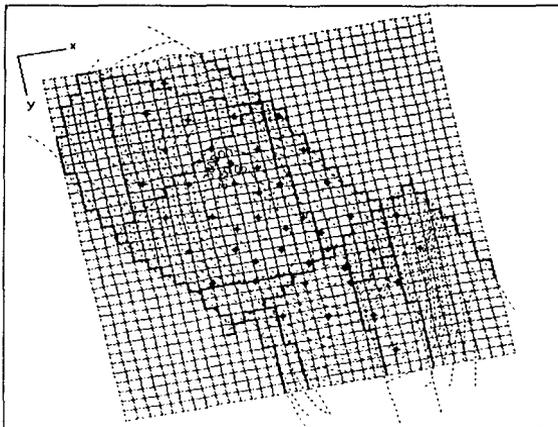


Figura 4.4 Construcción de la malla por encima de los mapas de contornos del yacimiento.

- 10) Se arregla la malla de tal manera que cubra las especificaciones deseadas, tales como son la orientación, posición e inclinación de la misma.
- 11) Se definen las fallas sobre las líneas de la malla siguiendo la dirección de estas.
- 12) Ya que esta lista la malla en el sentido areal se procede a cargar los mapas de los espesores, este yacimiento cuenta con 8.
- 13) El programa realiza una interpolación entre el mapa de cimbras y cada uno de los espesores.
- 14) Ya cargados los espesores se puede visualizar al yacimiento en 3 dimensiones, así como también se puede visualizar secciones transversales de donde se desee. En las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7, se visualizan al yacimiento en 3D desde diferentes ángulos. En las Figuras 4.8 y 4.9 se observan dos secciones transversales de la parte central del yacimiento.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

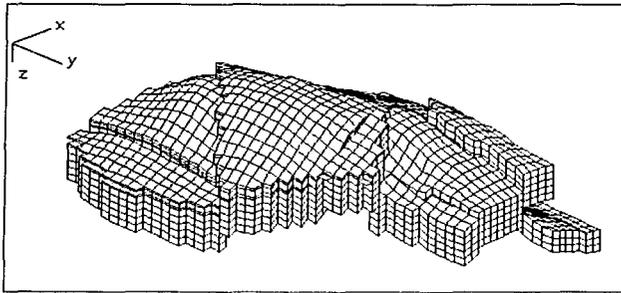


Figura 4.5 Malla en 3D

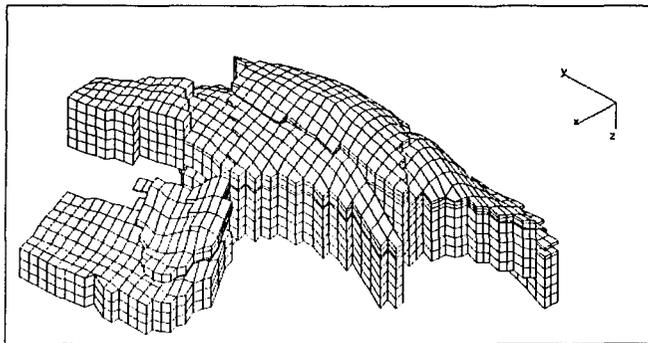


Figura 4.6 Malla en 3D

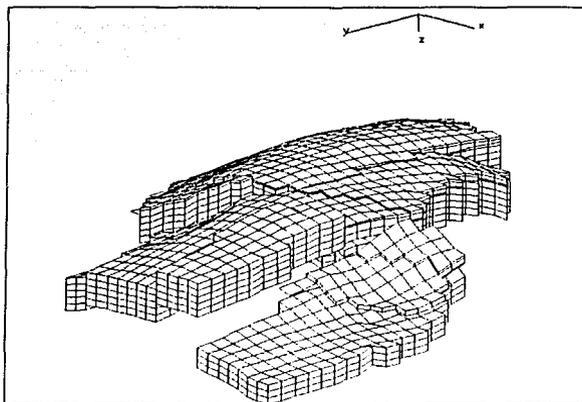


Figura 4.7 Malla en 3D

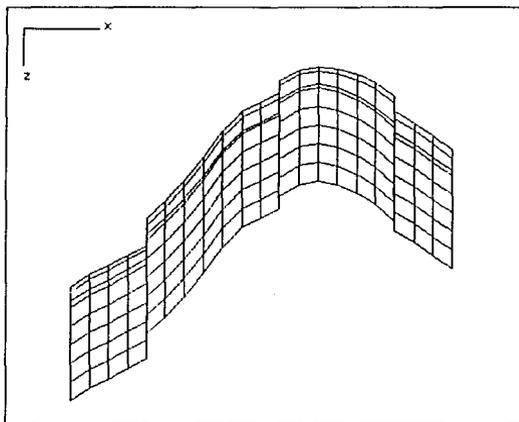


Figura 4.8 Sección transversal XZ de la parte central del yacimiento

- 15) Con los espesores cargados, se debe verificar visualmente la forma que adquiere el yacimiento en 3D para verificar las posibles diferencias o errores que adquiere la figura, y de esta manera poder corregirlos.

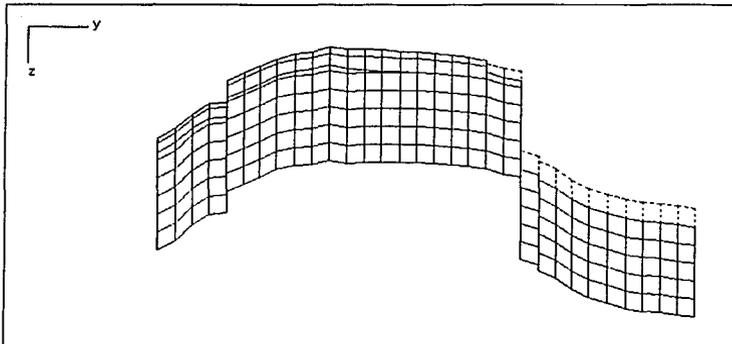


Figura 4.9 Sección transversal YZ de la parte central del yacimiento

- 16) Se cargan las propiedades petrofísicas mediante los mapas de propiedades, como son: porosidad, saturación de agua, permeabilidad, en cada una de las direcciones del sistema coordinado, relación de espesores neto-bruto, etc.
- 17) Se crea el archivo de salida, para que este pueda ser utilizado por el simulador y realizar el estudio.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## 5. ALGORITMO PARA CONSTRUIR UNA MALLA

A continuación se describe el algoritmo para la construcción de una malla irregular (PEBI) en 2 y 3 dimensiones.

### 5.1 Requerimientos de Datos Geológicos

Si se está conduciendo un estudio de todo un campo o de una región, los datos geológicos que describen la estructura y las propiedades de la roca del campo deben de estar disponibles para un buen estudio de simulación. Estos datos pueden ser desde un dibujo a mano o una copia del mapa que puede ser digitalizado en forma electrónica como un archivo en la computadora. Se utilizan los datos geológicos para describir la estructura del yacimiento (límites de la formación, espesores) para colocar la malla de simulación y asegurar que el número y tamaño de las celdas que se especificaron, crearon una malla suficientemente larga para cubrir el área de estudio. Una vez que se está satisfecho con la posición areal y la cobertura de la malla, se interpola desde los mapas estructurales y se asignan valores a cada celda. Generalmente, se necesita tener mapas para los límites, espesores, porosidad, permeabilidad y cubrir todas las capas del yacimiento. Si se está trabajando con una conceptualización de unidades de flujo, se necesitan esos mapas para cada unidad de flujo. Si el yacimiento es de doble porosidad, solo se necesita un mapa de cima y espesor para cada capa pero se requieren mapas separados de matriz y fracturas, para otras propiedades, así como un mapa de espaciamiento de fracturas. Si no se tienen mapas para una o más propiedades o capas, se pueden asignar valores constantes para cualquier propiedad de cualquier capa. También es posible emplear métodos geoestadísticos los cuales consisten

en obtener información a partir de valores puntuales mediante la utilización de métodos estadísticos como es el método de Kriging y Co-Kriging.

Cuando se hace un estudio piloto, se desea utilizar una geología idealizada con geometría y propiedades de la roca uniformes para cada capa. Se puede construir una malla sin abrir el archivo de un mapa. En cambio la interpolación de las propiedades de la celda desde mapas, puede asignar valores constantes para cada capa de simulación.

## 5.2 Generación de mallas

La generación de mallas numéricas ha llegado a ser una herramienta común por el uso de soluciones numéricas en ecuaciones de derivadas parciales en regiones con forma arbitraria. Esto es especialmente verdadero en el cómputo de fluidos dinámicos, donde ha llegado con mucho ímpetu el desarrollo de esta técnica, pero el procedimiento es igualmente aplicable a todos los problemas físicos que involucran las soluciones de campo. La generación numérica ha provisto la llave para remover el problema de las formas de los límites de los métodos de diferencias finitas, además estas mallas pueden servir para la construcción de mallas con el método de elemento finito. Con tal malla todos los algoritmos numéricos, diferencias finitas o elemento finito, son implantados en una malla cuadrada en una región rectangular indiferente de la forma y la configuración de la región física.

El área de la generación numérica de mallas es relativamente nueva en la práctica, aunque sus raíces matemáticas son muy antiguas (aproximadamente principios de 1900). Esta es un área que involucra un tanto el sentimiento del ingeniero en el comportamiento físico del yacimiento, el comportamiento funcional comprendido por los matemáticos, y mucha imaginación. La física del problema debe ser esencialmente los puntos de la malla a reunir, por eso una relación funcional de

esos puntos puede representar la solución física con suficiente exactitud. Las matemáticas controlan los puntos detectando a los gradientes en la evolución de soluciones físicas, evaluando la exactitud de la representación discreta de una solución, comunicando las necesidades físicas a los puntos, y proveen comunicación mutua entre los puntos dependiendo de como respondan a la física. La generación numérica de mallas se puede realizar a través de un procedimiento imaginario por medio de la distribución ordenada de observadores, o muestras de lugares, encima del campo físico en tal forma que la comunicación eficiente entre observadores sea posible y que todos los fenómenos físicos de todo el campo quizá se representen con suficiente exactitud por la colección finita de observadores. La estructura de una intersección de mallas de familias de líneas coordinadas permite a los observadores ser fácilmente identificados en relación de uno con el otro, y el resultado es una codificación mucho mejor utilizándose en una estructura triangular o en una distribución de puntos aleatoria. El sistema de generación provee alguna influencia sobre cada observador sobre los otros, así que si uno se mueve para obtener una mejor posición para la observación de la solución, este influenciará a los demás.

La generación numérica de mallas atrae a varias áreas de las matemáticas, y hace un gran énfasis sobre el desarrollo de las relaciones involucradas, además de las técnicas de aplicación.

### 5.3 Construcción de la malla PEBI

A continuación se muestran los algoritmos para la construcción de una malla irregular PEBI en 2 y 3 dimensiones

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.3.1 Malla PEBI en 2D

En esta sección se describen dos métodos para la construcción de una malla PEBI en 2 dimensiones.

#### 5.3.1.1 Primer método de la construcción de la malla



El método de volumen finito para la discretización permite construir ecuaciones diferenciales en sistemas de mallas generales formando una malla de triángulos, cuadrángulos convexos, radiales u otras mallas curvilineas. La interpretación heurística de este método sugiere, que para todas las celdas de toda la forma arbitraria, la solución de las ecuaciones diferenciales provee una razonable aproximación de la solución exacta. Pero cuando las integrales son evaluadas para los términos de flujo, varias aproximaciones son involucradas, y su calidad depende del grado de regularidad de la malla. Por un principio matemático del comportamiento de la convergencia, uno tiene que especificar más detalladamente las reglas para la construcción de las mallas.

Las mallas basadas en la bisección perpendicular han sido utilizadas previamente por mucho tiempo en muchas aplicaciones. Entre los campos de aplicaciones exitosas está la ingeniería eléctrica, la física, la mecánica cuántica, la cristalografía, la caracterización de las rocas, la biología y la mecánica de fluidos. Además la técnica de elemento finito para la construcción de mallas utilizan la bisección perpendicular. Narashiman y Witherspoon<sup>9</sup> utilizaron cada malla para calcular el flujo en una sola fase. El flujo multifásico fue considerado en una malla regular hexagonal por Prues y Bodvarsson<sup>10</sup>.

Algunos de los primeros intentos para utilizar mallas irregulares para flujo multifásico fueron avanzadas generalizaciones de proyectos con arreglos de cinco pozos, de un modo u otro mallas cartesianas distorsionadas (geometría punto

esquina. Sin embargo, esos métodos no solo carecían de principios matemáticos, sino también producían resultados erróneos en muchos casos. Por esta razón artículos recientes de mallas irregulares utilizaron las técnicas de volumen finito o elemento finito para justificar su discretización.

No todas las discretizaciones de mallas irregulares son basadas en la bisección perpendicular. Para una malla rectangular, hay dos diferentes caminos para construir las celdas, bloque centrado y bloque distribuido, el último en esencia equivale al método de bisección perpendicular. En el caso irregular, hay más alternativas para especificar los puntos de las celdas y las fronteras de las celdas. Pero en relación con las técnicas de volumen finito, es más natural trabajar con mallas de bisección perpendicular.

Como primer paso, los puntos son localizados dentro del yacimiento y conectados por líneas rectas para formar una malla de triángulos o rectángulos. Esta malla tiene que satisfacer ciertas condiciones de regularidad, como se indicará más adelante. El segundo paso, el sistema de celdas es construido desde la malla. Ver Figura 5.1.

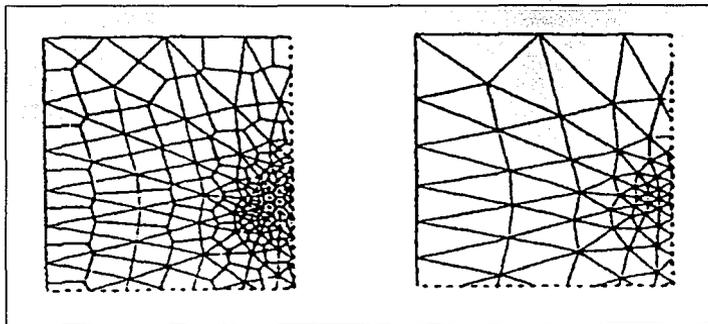


Figura 5.1 Malla y sistema de celdas<sup>11</sup>.

### 5.3.1.1.1 Posición de los puntos de la celda

Para mantener un error de truncamiento pequeño, la distribución de los puntos en el interior del yacimiento deben ser tan regulares como sea posible. Para mallas triangulares, considerando exactitud, los triángulos equilátero son óptimos. Por razones de flexibilidad, al menos algunos triángulos deben ser irregulares. Los puntos de las celdas deben ser colocados densamente en regiones donde se requiere mayor resolución o donde la solución es no lineal. Normalmente estas regiones están alrededor de los pozos. Esto causa que la malla llegue a ser irregular. Cualquiera de estas irregularidades son encerradas en una interfase angosta entre una malla gruesa y una malla fina (ambas siendo regulares), o los cambios del tamaño de la malla deben ser tan suaves como sea posible entre las regiones gruesas y finas.

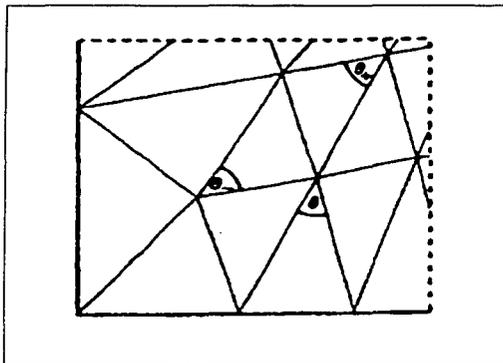
Aquí nos concentramos en el segundo caso (el primero es más o menos el refinamiento local de la malla).

La siguiente condición de regularidad es necesaria para evitar las transmisibilidades negativas y el traslape. Ver figura 5.2.

$\theta_1 + \theta_2 \leq \pi$  para los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  de vértices opuestos en la orilla común de dos triángulos

.....(4.1)

$\theta \leq \pi/2$  para el ángulo  $\theta$  en el vértice opuesto en una orilla de el llmite

Figura 5.2 Los ángulos  $\theta$ ,  $\theta^-$  y  $\theta^+$ 

Considerando el límite externo del yacimiento, permite asumir que es formado por polígonos. Al menos cada punto esquina del polígono tiene que ser un punto de la celda. Si hay diferentes clases de condiciones de frontera aplicadas en diferentes partes del límite (ejemplo, presión constante en un lado y no flujo en otro lado) el punto de colisión donde las condiciones de frontera cambian, tiene que ser también un punto de la celda. Adicionalmente, si las funciones en el límite tienen una discontinuidad (ejemplo, cambio en la presión en un límite con presión constante), entonces tales puntos de discontinuidad tienen que ser incluidos en la malla.

Descripción de la generación automática de las mallas:

1. Inicialmente, el yacimiento es cubierto con una malla hexagonal regular.
2. Cerca del límite, los puntos de la malla regular son proyectados dentro del límite o trasladados en dirección a las esquinas de los límites de los polígonos y hacia

la localización de los pozos. Por este paso, una zona de la malla hexagonal entre el límite y los alrededores de los pozos es deformada. Factores importantes son asignados al interior de los puntos de la celda.

3. Un procedimiento iterativo es aplicado para cada punto de la celda excepto puntos localizados en los pozos y puntos esquina. Los puntos límites, sin embargo, solo permiten cambiar su localización a lo largo del límite. Este procedimiento es iterativo. Los puntos de la celda que tienen un factor importante asignado, formarán una malla fina mientras los factores de baja importancia formarán una malla gruesa. Si todos los puntos tienen la misma importancia, este procedimiento converge a una malla formada por triángulos equiláteros en el interior y ligeramente deformados para marcar los límites.
4. Durante el proceso, las restricciones de ángulo de la ecuación 4.1 quizá sea violada. Después de cada iteración del proceso, este es verificado y la malla es ajustada adecuadamente por el cambio de algunos triángulos o por la eliminación de algunos puntos de la celda para asegurar la regularidad de la malla.
5. Los puntos de la malla son construidos por el método descrito en la siguiente sección.

#### 5.3.1.1.1 Construcción de celdas

Los puntos de la celda definidos por el procedimiento descrito son introducidos al algoritmo de la construcción de la celda. La vecindad relacionada está previamente establecida.

Heinrichs<sup>12</sup>, Mcneal<sup>13</sup> permiten definir las celdas por el significado de la bisección perpendicular. Cada punto de la celda del triángulo o rectángulo es asociado con una celda con lo cual se describe lo siguiente:

Los puntos de intersección de los lados bisectores perpendiculares del triángulo o del rectángulo, los centros de los triángulos y rectángulos alrededor de cada punto de la celda  $x$  será determinada. Para una  $x$  y un punto vecino  $\xi$  indicamos la orilla que conecta  $(x, \xi)$ . Si ninguno de los dos son puntos límite, dos centros corresponden al lado  $h(x, \xi)$ . En casos especiales pueden coincidir. Esos dos puntos serán conectados por un segmento bisector perpendicular  $\zeta(x, \xi)$ . Si  $x$  y  $\xi$  son puntos límite, el segmento entre el punto de intersección del bisector perpendicular y el "punto de perforación" del bisector en el límite será tomado y designado por  $\zeta(x, \xi)$ . Además,  $\zeta(x)$  denota el segmento del límite entre dos puntos perforados. Ver Figura 5.3.

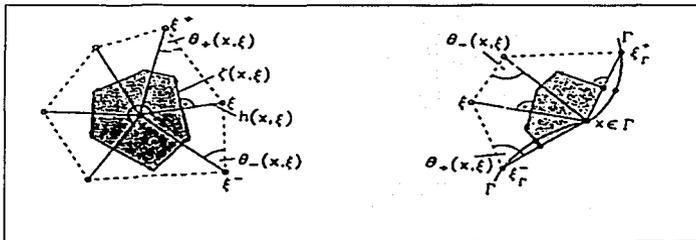


Figura 5.3 Construcción de la malla para un punto interior y un punto límite<sup>11</sup>

Ahora la celda alrededor del punto  $x$  es definida como región encerrada por el segmento  $\zeta(x, \xi)$  de todo los puntos vecinos  $\xi$ . Las condiciones de regularidad de la malla aseguran que la construcción de las celdas puede ser desempeñada correctamente.

Para una malla rectangular, este procedimiento sencillamente guía hacia una malla cartesiana de punto distribuido.

Este método puede ser modificado por problemas de permeabilidad anisotrópica. Para un  $\bar{k}$  anisotrópica, la bisección perpendicular  $\zeta(x, \xi)$ , no es más larga que la línea de unión de los puntos  $x$  y  $\xi$ , pero rotadas por un ángulo por eso para el vector normal  $\bar{n}(x, \xi)$ ,  $\bar{k}_n(x, \xi)$  es paralelo a  $h(x, \xi)$ .<sup>11</sup>

### 5.3.1.2 Segundo método de la construcción de la malla

El segundo método de la construcción de la malla no utiliza una malla hexagonal como base. Los puntos de la celda pueden ser distribuidos de forma arbitraria dentro del dominio

#### 5.3.1.2.1 Localización de los puntos de la celda

En el principio comúnmente se comienza con una malla de punto distribuido. Los puntos de la celda quizá se moverán hacia los pozos o fallas por los algoritmos predefinidos o por medio de ediciones gráficas.

Esto sucede por cada punto individual sin ninguna influencia de cualquier otro punto de la celda dentro del dominio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.3.1.2.2 Construcción de la celda

Cualquier punto de la celda generado estará dentro del algoritmo de la construcción de la celda. Todos los puntos son considerados para la construcción de la celda excepto los puntos borrados y los puntos imagen fuera de la ventana.

Los principales pasos del algoritmo se esbozan a continuación:

1. Tomar el primer punto de la celda en el puesto ( $i$ ).
2. Seleccionar una posición potencial ( $1-npot$ ) en la vecindad que este dentro de un radio dado al punto  $i$ . La extensión adecuada de este radio depende de la variación de la densidad nodal alrededor del punto  $i$ . Comúnmente, este radio es ligeramente mayor que la media del tamaño de la malla. Sin embargo, si la densidad nodal es considerablemente diferente para diferentes direcciones, este radio puede ser muy pequeño para encontrar todo el potencial de la vecindad. Después de la construcción de las celdas, estas podrían traslaparse o podrían dejar aberturas entre bloques. Incrementando el radio ( para incluir algunos vecinos en la dirección con baja densidad nodal ) resultaría en un gran número (superfluos) de vecinos en direcciones con alta densidad nodal. En este caso, el segmento buscado podría ayudar a obtener una mejor distribución de los vecinos alrededor del punto  $i$ . De este modo, el vecino más cercano proveerá de cada pieza del total.
3. Tomar el primer vecino potencial de la lista ( $j$ ).
4. Construir el bisector perpendicular a la línea seleccionada " $i$ " y " $j$ ".
5. Tomar al segundo vecino potencial en la lista ( $k=j+1$ )
6. Construir el bisector perpendicular a la línea, conectando " $i$ " y " $k$ ", e intersectando este con el bisector perpendicular a  $\bar{i}$ . Este resulta en un punto de intersección  $S$ .
7. Para todos los vecinos potenciales: Dibujar un vector desde  $m$  hasta  $i$  ( $m$  es el punto medio entre  $i$  y el vecino respectivo  $n_i$ , para  $i=1, n_{pot}$  y  $i \neq j, k$ ). Dibujar un vector desde  $m$  hasta  $S$ . Evalúa el ángulo formado por estos dos vectores. Este ángulo debe ser menor o igual a  $90^\circ$  para todos los vecinos potenciales antes de

un punto de intersección,  $S$  es aceptado como un punto esquina de la celda PEBI alrededor de  $i$  (el punto de intersección es el centro del triángulo formado por  $i, j$  y  $k$ ). La figura 5.4 es una representación de este principio. Se puede ver que el punto de intersección  $X_{17}$  (formado por el bisector perpendicular  $IN_7$  e  $IN_1$ ) es aceptado, porque el ángulo es menor de  $90^\circ$  (para un vecino potencial; sin embargo, la representación muestra solo un ángulo con vecino  $N_2$ ). El punto de intersección  $X_{18}$  no se acepta porque al menos el ángulo  $\theta$  con el vecino  $N_7$  es mayor de  $90^\circ$ .

8. Si  $S$  es aceptado, acumula los números de los vecinos potenciales que serán involucrados en la construcción de  $S$ . Son válidos de  $i$
9. Incrementar  $k$  ( para  $k \leq n_{pot}$  ) y ve al paso 6.
10. Incrementar  $j$  ( para  $j < n_{pot}$  ) y ve al paso 4.
11. Incrementar  $i$  y ve al paso 2.

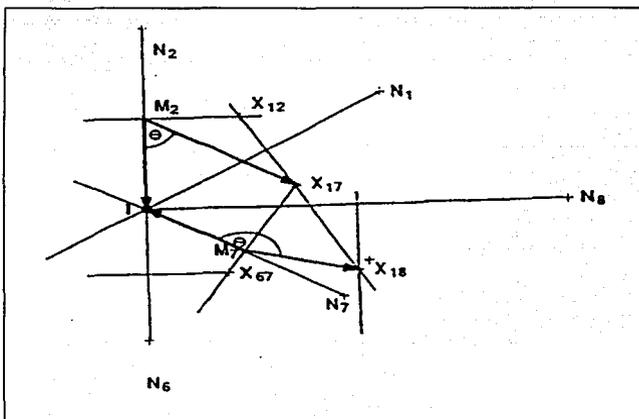


Figura 5.4 Construcción de la malla<sup>11</sup>

En algunos casos (siempre para celdas cartesianas regulares), más de un par de bisectores perpendiculares dan el mismo punto de intersección  $S$ . Por ejemplo, el vecino diagonal en el caso cartesiano causa la generación de multipliegues de  $S$ . Sin embargo, este vecino diagonal no es un vecino válido del punto  $i$ , porque las caras de las celdas comunicadas entre  $i$  y su vecino diagonal es de longitud cero. De este modo el vecino diagonal debe ser eliminado de la lista de vecinos válidos de  $i$ . Esto es acompañado de verificación, si la reserva de vecinos en la lista  $L_j$  está dentro de cualquier otra lista, así como  $L_{s_j}$  es la lista de los vecinos válidos pertenecientes a la construcción del punto de intersección  $S_j$  (con  $j=1$ ). Todos los vecinos válidos que corresponden a la cara de la celda con longitud diferente de cero (con dos diferentes puntos esquina) aparecerán dos veces en la lista de vecinos válidos,  $L_{s_j}$ . Primero fueron almacenados cuando la primera esquina de la cara de la celda fue construida, segundo, cuando el segundo punto esquina fue construido. Los vecinos diagonales en el caso cartesiano aparecerán solo una vez, solo de este modo pueden ser eliminados. Los vecinos restantes de  $i$  son llamados vecinos verdaderos y serán utilizados en la simulación<sup>11</sup>.

### 5.3.2 Construcción de la malla PEBI 3-D

Se explicará la localización 3-D de los puntos de la malla a través de un ejemplo práctico. Es modelado un pozo inclinado perforando varias capas.

#### 5.3.2.1 Localización de los puntos de la celda



La localización comienza con una caja tridimensional de puntos de la malla cartesiana que son datos de entrada. Dentro de esta caja pueden ser definidos cualquier número de trayectorias (triples coordenadas x-y-z). Después de la interpolación de las trayectorias, la imagen de las mismas son capturadas para que

sean corridas en forma paralela a la trayectoria. Dependiendo del deseo de la geometría de las celdas del pozo (rectángulos, hexágonos, octágonos, etc.) 4, 6 u 8 imágenes de trayectoria son calculadas como una distancia definida de la trayectoria verdadera. El número de puntos de la celda usados para modelar son también datos de entrada. Para un punto dado  $p$ , en la trayectoria verdadera todos los puntos sobre la imagen de trayectoria falsa en un plano normal al segmento de trayectoria,  $p$  es falso. Ver Figura 5.5

Los puntos de la celda cerrados a la posición calculada de el pozo y los puntos imagen son dibujados a esas nuevas posiciones. A través de esto, la malla cartesiana regular es distorsionada.

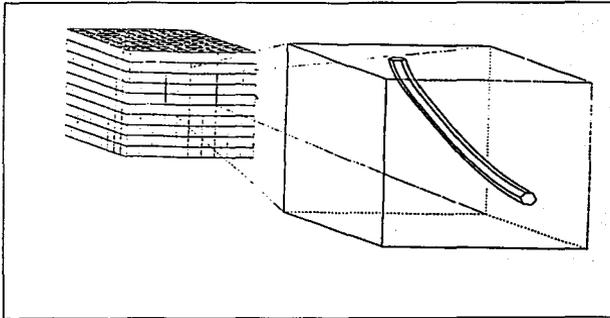


Figura 5.5 Modelado de un pozo inclinado con una malla PEBI 3D<sup>11</sup>

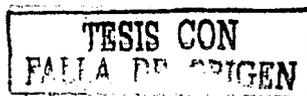
### 5.3.2.2 Construcción de las celdas

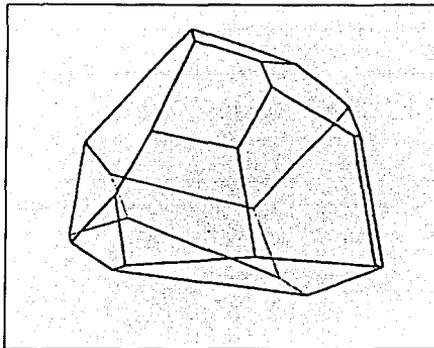
Cualquier distribución de los puntos de la celda 3-D pueden ser datos de entrada para este algoritmo. La relación vecinal aún no está definida.

El algoritmo de la construcción de la celda es descrito a continuación:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1. Tomar un punto de la malla en la posición ( $i$ ).
2. Seleccionar una posición de un vecino potencial alrededor del punto  $i(1-n_{pot})$ .
3. Tomar un punto en esta posición ( $j=1, n_{pot}$ )
4. Construir un plano normal a la línea seleccionada  $i$  y  $j$ .
5. Construcción de la cara de la celda  $\xi$  ( $\xi=1, n_c$ ):
  - a) Tomar otro vecino potencial en la posición ( $k=1, n_{pot}, k \neq j$ ).
  - b) Construir un plano normal a la línea  $\overline{ik}$ .
  - c) Tomar un tercer vecino en la posición ( $l=k+1, l \neq j$ )
  - d) Construir un plano normal a la línea  $\overline{il}$ .
  - e) Intersecar los tres planos, para resultar en S.
  - f) Verificar si S está lo suficientemente cerrado para llegar a ser un punto esquina del bloque alrededor de  $i$  (por medio del cálculo del producto punto).
  - g) Si es sí, verificar si S fue construido antes.
  - h) Si no fue construido antes, guardar como parte de la cara de la celda  $\xi$ .
  - i) Incrementar  $l$  (para  $l \leq n_{pot}$ ) y ve al paso 5c.
  - j) Incrementar  $k$  (para  $k \leq n_{pot}$ ) y ve al paso 5a.
  - k) Todas las esquinas de la cara de la celda  $\xi$  son calculadas ahora. Esta verificación elimina la cara de los bloques reduciendo a una línea o hasta un punto sencillo ( como sucede en un caso regular cartesiano).
  - l) Ordenar las esquinas a la cara  $\xi$ .
  - m) Almacenar al vecino  $j$  como si fuera un vecino verdadero de un punto  $i$ .
6. Incrementar  $j$  (para  $j < n_{pot}$ ).
7. Incrementar  $\xi$  e ir al paso 4 (construcción de la siguiente cara del bloque  $\xi$ ).
8. Incrementar  $i$  e ir al paso 2. Ver Figura 5.6



Figura 5.6 Celda de una malla PEBI 3D<sup>11</sup>

### 5.3.2.3 Proyección vertical de la malla

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Como se describe en la sección precedente, el procedimiento de construcción de la malla por bisección perpendicular puede aplicarse en 3 dimensiones.

En lugar de triángulos, los tetraedros en 3 dimensiones tienen que ser considerados. La celda resultado son poliedros y son llamadas celdas Winger-Seitz o poliedros Voronoi. El sistema de celdas final no solo será complicado, también será confuso y difícil de imaginar para un ingeniero de yacimientos. Ver Figura 5.7.

Usando una malla cartesiana, los puntos de la celda son comúnmente definidos en el plano horizontal y proyectados verticalmente en todas las capas del yacimiento. Una aproximación de tubos de corriente es utilizada en la sección cruzada. Esta aproximación es práctica para yacimientos de capas delgadas donde la extensión

vertical de la celda es más pequeña que la horizontal por un orden de magnitud, el cual es verdadero en la mayoría de los casos de simulación de yacimientos. El mismo principio puede ser aplicado a la malla PEBI.

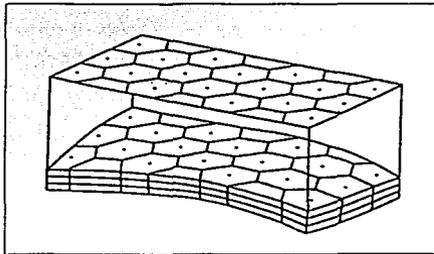


Figura 5.7 Proyección vertical de una malla irregular<sup>11</sup>

### 5.3.2.4 Sección Cruzada

La construcción de mallas en el plano vertical se muestra en las siguientes figuras:

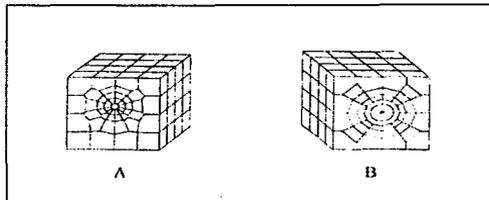


Figura 5.8 Sección cruzada<sup>11</sup>

Una sección cruzada alrededor de un pozo horizontal es modelado mediante unas celdas de simetría radial en honor al carácter radial del flujo alrededor de un pozo.

La Figura 5.8 A muestra una celda octagonal del pozo dentro de una ventana colocada alrededor del pozo horizontal. La celda del pozo tiene una extensión comparable a otras celdas de la malla. La Figura 5.8 B muestra una malla en donde las celdas alrededor del pozo son anillos.

La celda del pozo es del mismo tamaño como del agujero. Las celdas alrededor del agujero son reunidas para llegar a ser anillos.

El pozo horizontal puede estar en direcciones arbitrarias. La transición entre la malla radial alrededor del último punto del pozo es comúnmente un resultado difícil. Los pozos tienen que penetrar el yacimiento en la dirección del pozo, si es utilizada una malla híbrida se aproxima al modelado de flujo radial, o algunos tipos de celdas esféricas para conectar las celdas radiales con las celdas cartesianas.

Este modelo no padece de esos problemas como los algoritmos de mallas PEBI 3D, automáticamente construye una transición suave y consistente entre la malla radial y la cartesiana.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ◆ El resultado de un estudio de la simulación de un yacimiento, constituye una información relevante para efectuar operaciones óptimas de explotación de yacimientos en el futuro, aplicando el método más redituable de todos los posibles que fueron contemplados durante el estudio.
- ◆ La veracidad de los resultados de un estudio de simulación dependerá de la información disponible de entrada, el correcto ajuste de la historia, la buena selección de la malla, la construcción y el espaciamiento, así como también de los incrementos de tiempo.
- ◆ En forma ideal, realizar un estudio de simulación con una malla que cuente con un gran número de celdas aumentaría las probabilidades de un buen resultado, pues este se aproximaría más a la realidad, además, disminuiría las distorsiones causadas por la dispersión numérica. En el pasado esto no era práctico debido al tiempo, capacidad de cómputo y costo que implicaría. Actualmente existen equipos de computo de alto desempeño (CLUSTER) mucho más baratos que los servidores SGI ORIGIN o CRAM que hacen que actualmente se tenga simulación de más de un millón de celdas en tiempos de procesos prácticos.
- ◆ Las celdas deben de ser más finas en las partes donde se presentan cambios bruscos y representativos dentro del yacimiento, como puede ser en las cercanías de los pozos; y deben ser más gruesas en las partes donde existen menos cambios, como por ejemplo un acuífero. Deben de evitarse los cambios bruscos de tamaño entre celdas ya que pueden conducir a errores en los resultados.

- ◆ La selección de los diferentes tipos de mallas para modelar un yacimiento debe de realizarse mediante el análisis de los requerimientos del problema, ya que de esto dependerá la obtención de un buen resultado del estudio. Algunas de las características que se pueden considerar son: los datos geológicos disponibles y el tamaño del yacimiento, tipo de desplazamiento o explotación del yacimiento, tipo y localización de los pozos, exactitud deseada, disponibilidad de software, objetivo de la simulación, disponibilidad del equipo de cómputo y del tiempo.
- ◆ Para la construcción gráfica de una malla es imprescindible el manejo de un equipo de cómputo, pues de lo contrario se tendría que realizar a mano, lo implicaría la inversión de mucho tiempo y personal (como alguna vez se realizo en el pasado). La automatización nos provee de grandes ventajas para resolver estos problemas.
- ◆ Las mallas irregulares PEBI tienen la capacidad de definir con gran precisión zonas del yacimiento difíciles de representar con otro tipo de mallas, como lo es en lugares donde existe la presencia de fallas, así como también en zonas donde existen cambios bruscos y se requiere del uso de una malla fina. Además de esto, es la malla que garantiza el mayor grado de ortogonalidad, y esto conlleva a mejores resultados en un estudio de simulación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Mattax, C.C., Dalton, R.L. "Reservoir Simulation" Primera impresión Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers, Richardson Tx. 1990.
- Bradley Howard B. "Petroleum Engineering Handbook" Primera impresión Society of Petroleum Engineers, Richardson Tx. 1987.
- Sharpe H. N., Anderson, D.A. "Orthogonal Curvilinear Grid Generation whit Present Internal Reservoir Simulation". SPE :21235. Febrero 1991.
- Heineman, Z. E. "Advances in Gridding Techniques" Fifth International Forum on Reservoir Simulation. Muscat, Oman. Dic. 10-14, 1994.
- Pedrosa, Jr., O.A. and Aziz, K. "Use of Hybrid Grid in Reservoir Simulation," SPERE, 611-621, November 1986.
- Pag <http://www.erc.msstate.edu/education/gridbook/prefc/text.html>
- Henry L. Doherty, "Basic Applied Reservoir Simulation" Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas 2001.
- Guía para el usuario IMEX.
- Settari, A. Y Aziz, K. "Use of Irregular Grid in Reservoir Simulation", SPE, Vol 12, No 2 103-114(1972).
- Heinemann, Z. E. y Brand, C. W. "Gridding Techniques in Reservoir Simulation," Proceedings of the First and Second International Forum on

reservoir Simulation, Alpbach, Austria, September 12-16, 1988 and September 4-8, 1989.

- Pedrosa, Jr., O.A. and Aziz, K. "Use of Hybrid Grid in Reservoir Simulation," SPERE, 611-621, November 1986.
- Eikran, S. "A Coordinate System for Local Grid Refinement Close to Wells," IN SITU, 16(1), 75-87, 1992.
- Forsyth, P. A. "A Control Volume Finite Element Method for Local Mesh Refinement," SPE 18415, February 6-8, 1989.
- Fung, L. S. Hiebert, A.D. and Nghiem, L.X. "Reservoir Simulation With a Control Volume, Finite-Element Method," SPE 21224, February 17-20, 1991.
- Hirasaki, G. J. and O'Dell, P.M. "Representation of Reservoir Geometry for Numerical Simulation," SPE, 393-404, December 1970.
- Wadsley, W.A. "Modeling Reservoir Geometry With Non-Rectangular Coordinate Grids," SPE 9369, September 21-24, 1980.
- Fleming, G.C. "Modeling the Performance of Fractured Wells in Pattern Floods Using Orthogonal, Curvilinear Grids," SPE 16973, September 27-30, 1987.
- Garcia, M. H., Journal, A. G. and Aziz, K. "Automatic Grid Generation for Modeling Reservoir heterogeneties," SPE 21471, May 1992.
- Farmer, C. L., Heath, D.E. and Moody, R.O. "A Global Optimization Approach to Grid Generation." SPE 21236, February 1991.

- Palagi, C., Aziz, K. "The Modeling of Flow in Heterogeneous Reservoir With Voronoi Grid," SPE 25259, March 1993.
- Aziz, K. " Reservoir Simulation Grids: Opportunities; and Problems", SPE 25233, Marzo 1993.
- Palagui, C., Aziz, K. "Use of Voronoi Grid In Reservoir Simulation". SPE 26951. Octubre 1991.
- Staggs, H.M. and Herbeck, E.F.; "Reservoir Simulation Models An Engineering Overview", JPT (Dec 1971) 1428-36.
- Manual de Usuario Eclipse 100.

## REFERENCIAS

1. Henry L. Doherty, "Basic Applied Reservoir Simulation" Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas 2001.
2. Mattax, C.C., Dalton, R.L. "Reservoir Simulation" Primera impresión Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers, Richardson Tx. 1990.
3. Staggs, H. M. And Herbeck, E.F. "Reservoir Simulation Models and Engineering Overview", JPT (Dec. 1971) 1428-36.
4. Yusuke, K. Maghsood, A. "Development and Applications of a Three Dimensional Voronoi-Based Flexible Grid Black Oil Reservoir Simulator", SPE 37028, Australia, 1996.
5. Sharpe H.N. "Orthogonal Curvilinear Grid Generation With Preset Internal Boundaries for Reservoir Simulation" SPE 21235, California 1991.
6. Barrera P., González G., Rivera A., Ugalde I. "Generación de Mallas en Regiones Planas Irregulares Usando Métodos Variacionales Continuos". SPE Ciencias 1997.
7. Heinemann, Z. "Advances in Gridding Techniques" Fifth International Forum on Reservoir Simulation , OMAN 1994.
8. Heinemann , Z. "Modeling Heavily Faulted Reservoirs" SPE 48998 Louisiana 1998

9. Nararashiman, T.N. and Witherspoon, P.A. "An Integral Finite Difference Method for Analyzing Fluid Flow In Porous Media" Water Resources Research, (Feb 1976).
10. Prues , Kand Bodvarsson, G.S. " A seven-Point Finite Difference Method for Improved Grid Orientation Performance in Pattern Steamfloods" SPE 12252, San Francisco 1983.
11. Heinemann, Z. "Advances in Reservoir Simulation Gridding" Fourt International Forum on Reservoir Simulation, Austria 1992.
12. McNeal, R.H "An Asymmetrical Finite Difference Network" Quart .Appl Math (Nov 1953).
13. Heinrichs, B "Finite Difference Methods on Irregular Networks" Verlag Birkhauser, Basel, Boston, Sttugart 1987.
14. Peaceman, D. W. "Interpretation of Wellblock Pressures in Numerical Reservoir Simulation" SPE June 1983.

## APENDICE A MALLADORES COMERCIALES

### Simulador CMG

El CMG es un Simulador composicional, lo cual le permite simular yacimientos en los que existen cambios significativos en la composición del fluido en el momento de su explotación.

El simulador CMG puede ser utilizado en procesos de recuperación secundaria en procesos miscibles o inmiscibles, tales como empuje por gas enriquecido, empuje de gas en solución a alta presión, inyección de CO<sub>2</sub> y reinyección de condensados de gas.

La simulación puede ser resuelta de manera explícita e implícita y parcialmente implícita, este último se refiere a la simulación implícita de una parte seleccionada de la malla con el fin de obtener mejores resultados en lugares donde existen cambios bruscos en la velocidad del flujo, como es en las cercanías del pozo.

El simulador CMG tiene un módulo llamado "Builder" el cual tiene la capacidad de construir mallas del tipo espesor variable, de punto esquina; también construye mallas cartesianas, cilíndricas, elípticas e híbridas.

Los acuíferos se modelan al agregar celdas límites que solamente contienen agua o al emplear el modelo de acuífero analítico propuesto por Carter y Tracy.

El simulador CMG puede ser ejecutado en numerosas computadoras de numerosos fabricantes tales como IBM, SGI, y SUN, al igual que PC bajo WIN95/98 y NT.

## **Simulador SURE**

El mallador SUREGrid puede crear archivos que pueden ser utilizados como interfase en otros simuladores como es el VIP, ECLIPSE, STARS y SURESim. Puede correr en la plataforma de Microsoft Windows o UNIX.

Con el mallador SUREGrid se pueden importar fallas directamente de aplicaciones de modelado geológico 3D, como puede ser "Antero", "Stratamodel", "IRAP RMS", "EarthVision" o "Geoframe Property 3D". También se pueden importar fallas y horizontes de paquetes de mapeo como es "Z-MAP" o "Gráficas Dinámicas".

El mallador SUREGrid utiliza la tecnología PEBI (Bisección perpendicular) para crear mallas que representen yacimientos con diferentes tipos de fallas sin distorsión.

SureGrid permite mezclar varios tipos de mallas en el mismo modelo, cuadrados, diagonales, hexagonales, y refinamientos areales, así como en las verticales también se puede hacer en trayectorias de pozos horizontales y desviados.