



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Faculdade de Geologia

Cleveland Maximino Jones

**Aplicação do conceito de área exaurida à região de águas rasas da bacia petrolífera de Campos, utilizando ferramentas de modelagem do processo exploratório**

Rio de Janeiro

2009

Cleveland Maximino Jones

**Aplicação do conceito de área exaurida à região de águas rasas da bacia petrolífera de Campos, utilizando ferramentas de modelagem do processo exploratório**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Aquini Fernandes Chaves

Co-orientador: José Diamantino de Almeida Dourado

Rio de Janeiro

2009

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/C

J76 Jones, Cleveland Maximino.  
Aplicação do conceito de área exaurida à região de águas rasas da bacia petrolífera de Campos, utilizando ferramentas de modelagem do processo exploratório.- 2009.  
141 f. : il. color.

Orientador: Hernani Aquini Fernandes Chaves.  
Co-orientador: José Diamantino de A. Dourado.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia.

1. Campos petrolíferos - Teses. 2. Modelagem geológica - Teses. 3. Jazidas de petróleo – Avaliação - Teses. 4 Campos, Bacia de (RJ) – Teses. I. Chaves, Hernani Aquini Fernandes. II. Dourado, José Diamantino de Almeida. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 553.982(815.3)

Cleveland Maximino Jones

**Aplicação do conceito de área exaurida à região de águas rasas da bacia petrolífera de Campos, utilizando ferramentas de modelagem do processo exploratório**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 18 de dezembro de 2008.

Orientadores:

---

Prof. Dr. Hernani Aquini Fernandes Chaves (Orientador)  
Faculdade de Geologia da UERJ

---

Prof. Dr. José Diamantino de Almeida Dourado (Co-orientador)  
Faculdade de Geologia da UERJ

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Egberto Pereira  
Faculdade de Geologia da UERJ

---

Dr. Olinto Gomes Souza Junior  
Petrobras

Rio de Janeiro

2009

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Hernani Aquini Fernandes Chaves, por sempre ter uma noção clara dos objetivos desta Pesquisa, quando eu nem sempre os conseguia manter.

Ao meu co-orientador, Prof. José Diamantino de Almeida Dourado, pelo apoio constante e as generosas doses de ânimo.

Ao Dr. Olinto Gomes de Souza Jr., pelas suas valiosas contribuições e comentários.

Ao Professor Egberto Pereira, e ao Professor Sérgio Bergamaschi, que participaram das bancas dos Seminários de Mestrado.

Aos professores da Faculdade de Geologia da UERJ, que aceitaram confiar em minha proposta de Pesquisa de Mestrado.

Aos servidores da Pós-Graduação e do Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, pelo apoio durante tantas oportunidades em que precisei de seus serviços.

## RESUMO

JONES, Cleveland Maxmino. *Aplicação do conceito de área exaurida à região de águas rasas da bacia petrolífera de Campos, utilizando ferramentas de modelagem do processo exploratório*. Rio de Janeiro, 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

O objetivo desta Pesquisa de Mestrado foi propor uma metodologia de avaliação de reservas a descobrir (óleo iminente a descobrir - *yet-to-find-oil*), que utiliza métodos estocásticos e análises probabilísticas, aplicados às informações disponíveis sobre bacias com largo histórico exploratório, e que incorpora informações sobre a área exaurida por esforços exploratórios passados. As simulações estocásticas foram realizadas por uma ferramenta de modelagem do processo exploratório de ciclo completo, disponível comercialmente, e também no Laboratório de Correlação Geológica (LABCG) da Faculdade de Geologia da UERJ. Uma aplicação prática dessa metodologia composta, de modelagem estocástica e ajuste por área exaurida, foi realizada no *play* definido como a área de águas rasas da Bacia de Campos. Utilizando apenas dados parciais sobre as descobertas de campos de petróleo e gás, os resultados sugerem que essa área ainda não pode ser considerada exploratoriamente madura. Também foram apontadas interessantes perspectivas de descobertas adicionais de acumulações totais de óleo e gás, e de acumulações individuais de tamanhos significativos. A aplicação da metodologia proposta em bacias com largo histórico exploratório, como a Bacia de Campos em águas rasas, mostrou-se perfeitamente viável. Outro objetivo desta Pesquisa foi ajudar a desenvolver, dentro da Faculdade de Geologia, um pólo de conhecimento sobre os processos de avaliação de *yet-to-find-oil*, e sobre as ferramentas de modelagem do processo exploratório.

Palavras-chave: Óleo iminente a descobrir. Avaliação de reservas. Modelagem do processo exploratório. Área exaurida. Maturidade exploratória.

## ABSTRACT

The objective of this Master's Project was to propose a methodology of evaluation of yet-to-find-oil, which utilizes stochastic methods and probabilistic analyses applied to the information available about basins with a long exploratory history, and which incorporates information about the area exhausted by previous exploratory efforts. The stochastic simulations were carried out by a full cycle, exploratory process modeling tool which is available commercially, and also at the Laboratory of Geological Correlation (LABCG) of the Geology Department at UERJ. A practical application of this composite methodology, using stochastic modeling and adjustment for area exhausted, was made in the *play* defined as the shallow waters of the Campos Basin. Utilizing only partial data about the discoveries of oil and gas fields, the results suggest that this area cannot yet be considered a mature exploratory *play*. Interesting perspectives for the discovery of additional total accumulations of oil and gas were also indicated, as well as individual accumulations of significant size. The application of the proposed methodology in basins with a reasonably extensive exploratory history, such as the Campos Basin in shallow waters, was shown to be perfectly viable. Another objective of this research was to help develop, within the Geology Department, a local knowledge center regarding the processes for evaluation of yet-to-find-oil, and about exploratory process modeling tools.

Keywords: Yet-to find-oil. Reserve evaluation. Exploratory process modeling. Area exhausted. Exploratory maturity.

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	3
1.1. Organização da Pesquisa .....	4
1.2. Objetivo .....	6
1.3. Justificativa para a Pesquisa de Mestrado .....	8
2. Conceitos de avaliação de reservas a descobrir ( <i>yet-to-find-oil</i> ) .....	12
2.1. O Processo Exploratório .....	12
2.2. Avaliação Convencional de Recursos em Acumulações Individuais.....	14
2.3. Avaliação do Potencial de Recursos com Base em Informações Históricas	15
2.4. Métodos Quantitativos .....	16
2.5. Métodos Computacionais .....	18
2.6. Fórmula de Arps e Roberts.....	20
2.7. Área de Influência de um Poço.....	21
2.8. Área Exaurida.....	25
2.9. Experiência Exploratória .....	27
2.10. FSD - <i>Field Size Distribution</i> (Distribuição do Tamanho dos Campos) .....	30
2.11. Quantificação de Reservas a Descobrir.....	40
2.12. Métodos Probabilísticos.....	41
2.13. Métodos Estocásticos.....	44
2.14. Simulações de Monte Carlo.....	45
2.15. Teorema de Bayes.....	49
2.16. Aplicação dos Modelos.....	53
2.17. WA2000 - USGS World Petroleum Assessment 2000.....	57
3. Ferramentas da Metodologia de Modelagem Estocástica e Ajuste por Área Exaurida.....	62
3.1. Ferramenta de Sistema de Informações Geográficas – SIG.....	62
3.2. Ferramenta para Determinação da Área de Influência de um Poço .....	65
3.3. Ferramentas de Modelagem do Processo Exploratório de Ciclo Completo...	70
3.4. A ferramenta GeoX .....	72
3.5. Parâmetros de Entrada do GeoX.....	81



3.6. Fator de Recuperação.....	84
3.7. MEOR – <i>Microbial Enhanced Oil Recovery</i> .....	86
4. A Bacia de Campos.....	88
4.1. Arcabouço Geológico .....	88
4.2. Dados Sobre a Área Estudada .....	93
4.3. O BDEP - Banco de Dados de Exploração e Produção, da ANP .....	94
4.4. Outras Fontes de Informações sobre a Região de Águas Rasas da Bacia de Campos .....	96
5. Aplicação da Metodologia de Modelagem Estocástica e Ajuste por Área Exaurida, à Área de Águas Rasas da Bacia de Campos.....	99
5.1. Preparação das Informações Disponíveis .....	99
5.2. Utilização da Ferramenta de Modelagem do Processo Exploratório GeoX...104	
5.3. Ajuste dos Resultados Apresentados pelo GeoX para Levar em Conta a Área Exaurida.....	105
6. Resultados.....	112
6.1. Maturidade Exploratória da Bacia de Campos em Águas Rasas.....112	
6.2. Perspectivas de Novas Descobertas ( <i>yet-to-find-oil</i> ) .....	115
6.3. Perspectivas para Aplicação da Metodologia de Modelagem Estocástica e Ajuste por Área Exaurida, em Outras Áreas.....	124
7. Conclusões e Etapas Futuras.....	125
7.1. Conclusões.....	125
7.2. Etapas Futuras .....	126
Referências Bibliográficas.....	129
Anexo 1 - Transcrição compilável do programa em FORTRAN, de Schuenemeyer e Drew (1977), para determinação da área de influência de um poço.....	135
Anexo 2 – Planilha com os dados do BDEP, na forma em que estão disponíveis (só primeira página).....	141

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A expansão das fronteiras exploratórias (Fonte: Petrobras, Plano de Negócios 2006-2010) .....	10
Figura 2 – Representação de um campo típico, com forma elíptica (Fonte: Drew, Schuenemeyer, Bawiec, 1980).....	22
Figura 3 – Representação da área de influência de um poço, com elemento de exaustão absoluta, no interior, e elemento de exaustão parcial, compreendido entre a região de exaustão absoluta e a borda externa (Fonte: Drew, Schuenemeyer, Bawiec, 1980).....	23
Figura 4 – Probabilidade (eixo vertical) de exaustão em redor de um poço, conforme a distância do poço, $rd$ (Fonte: Drew, Schuenemeyer, Bawiec, 1980) .....	24
Figura 5 – Ilustração do conceito de junção de áreas de influência individuais, com sobreposição, gerando uma área de exclusão que não inclui sobreposições (Fonte: Drew, Schuenemeyer e Bawiec, 1980).....	25
Figura 6 – Representação esquemática do número de descobertas cumulativas (eixo vertical) conforme a área exaurida (Fonte: Drew, 1990).....	27
Figura 7 - O Conceito de Eficiência Exploratória, “c”, representado pela fração de alvos descobertos (eixo vertical) conforme a fração da bacia que é exaurida por esforços exploratórios (Fonte: Drew, 1990).....	29
Figura 8 - Exemplo de FSD de acumulações com uma distribuição do tipo auto-semelhante perfeita - a cada duplicação do tamanho, o número de acumulações é reduzido pela metade (Fonte: The Oil Drum, 2006)....	33
Figura 9 - Curvas de FSD mais realistas, com diferentes graus de ajuste em relação à distribuição auto-semelhante perfeita (Fonte: The Oil Drum, 2006) .....	33
Figura 10 – Uma curva log-normal é apenas um exemplo particular da classe mais geral de fractais parabólicos (Fonte: Laherrère, 1994).....	34
Figura 11 - Distribuição da frequência de ocorrência dos campos de petróleo descobertos na Bacia de Denver, até 1958 (eixo vertical), conforme a	

classe de tamanho dos campos em milhares de barris (Fonte: Arps e Roberts, 1958) .....	35
Figura 12 - Exemplo de FSD para os campos descobertos no Rifte do Sul do Sudão, com as extremidades delimitadas pelo tamanho máximo e mínimo esperado para os campos desse <i>play</i> (Fonte: Rodgers, 2002).....	36
Figura 13 - Curva de FSD cumulativa, mostrando os pontos representando as descobertas realizadas no Rifte do Sul do Sudão, assim como o tamanho mínimo e máximo dos campos esperados nesse <i>play</i> (Fonte: Rodgers, 2002) .....	36
Figura 14 - Exemplo de curva de <i>Discovery Sequence</i> (Fonte: Campbell, 2002). 37	
Figura 15 - Exemplo de bacias que apresentam curvas de <i>Discovery Sequence</i> com tendência horizontal, e que podem ser consideradas exploratoriamente maduras (Fonte: Rodgers, 2002) .....	38
Figura 16 - Método para montar uma FSD para qualquer <i>play</i> , dados os tamanhos máximo e mínimo das acumulações: Escolhida a curva correspondente, simulações Monte Carlo podem descrever as acumulações individuais a serem descobertas (Fonte: White, 1992).....	40
Figura 17 – A diferença entre uma abordagem probabilística e uma abordagem determinística, nos resultados oferecidos e nos custos. Os resultados probabilísticos (P90, P50, P10) dispensam esforços adicionais para chegar a um resultado determinístico (Fonte: Rose, 2007).....	43
Figura 18 - Descrição dos passos do processo de simulação de Monte Carlo utilizado pelo WA2000, repetidos 50.000 vezes (Charpentier e Klett, 2002) .....	48
Figura 19 - Tela de entrada de parâmetros de incerteza (" <i>risk factors</i> ") em nível de <i>play</i> e de prospecto, na ferramenta GeoX .....	53
Figura 20 - Experiência Exploratória em ciclos, referente à Bacia de Denver, EUA, mostrando o número de descobertas (eixo vertical) conforme a área exaurida, em milhas quadradas (Fonte: Drew, 1990 .....	56

Figura 21 - Explicação da Experiência Exploratória em ciclos (Fonte: Chaves et al, 1984a) .	56
Figura 22 – Elementos de um TPS (Fonte: Caluyong, 2006).....	57
Figura 23 – O conceito de <i>Total Petroleum System</i> utilizado pelo USGS (Fonte: USGS, 2002)	59
Figura 24 – As AUs no TPS Lagoa Feia-Carapebus: em azul claro os Carbonatos do Cretáceo; em roxo os Turbiditos do Cretáceo Superior/Terciário; em amarelo a Província Salífera/Arenitos do Terciário ((Fonte: USGS, 2002)	60
Figura 25 – Organização de Sistemas de Informações Geográficas (Fonte: Câmara et al, 1996).....	64
Figura 26 – Exemplo de um dos mapas sequenciais gerados pelo programa de Schuenemeyer e Drew, para mapear sequências de exaustão exploratória (Fonte: Schuenemeyer e Drew, 1977).....	68
Figura 27 – Detalhe de um dos mapas sequenciais gerados pelo programa de Schuenemeyer e Drew, mostrando como são representadas as regiões de diferentes probabilidades de exaustão. Os “W” no centro das nuvens de símbolos representam a localização dos poços (Fonte: Schuenemeyer e Drew, 1977).....	69
Figura 28 – Módulos do GeoX (Fonte: Caluyong, 2006).....	73
Figura 29 – Requisitos para dados de entrada do GeoX (Fonte: Caluyong, 2006)	75
Figura 30 – Concepção do ciclo completo de avaliação de um empreendimento exploratório – Notar a redução da escala, à medida que o foco é deslocado para os elementos à direita (Fonte: Caluyong, 2006).....	77
Figura 31 – Tela de entrada de valores volumétricos (Fonte: GeoX).....	77
Figura 32 – Tela de entrada de valores de reservatório (Fonte: GeoX).....	78
Figura 33 – Tela de entrada de funções probabilísticas (Fonte: GeoX).....	80
Figura 34 – Tela de resultados (Fonte: GeoX).....	81

Figura 35 – Fases do rifteamento do supercontinente Gondwana: Início do rifte, no Aptiano Superior e no Campaniano Superior (Fonte: Fainstein 2002).....	88
Figura 36 - Seção geológica da Bacia de Campos mostrando a fase sinrifte (“Seqüência Rift”) (Fonte: Modificado de Rangel e Martins, 1998).....	89
Figura 37 - Carta estratigráfica da Bacia de Campos (Fonte: Rangel, 1994).....	90
Figura 38 – Horizontes mapeados na carta estratigráfica (Fonte: Fainstein, 2002).....	91
Figura 39 – Mapa de estruturas significativas da bacia de Campos (Fonte: Guardado et al, 2000).....	92
Figura 40 - Bacia de Campos mostrando grandes áreas de águas rasas (Fonte: CPRM).....	93
Figura 41 - Tela de acesso aos mapas da CPRM (“mapoteca”) (Fonte, CPRM, 2008).....	94
Figura 42 - Tela de acesso aos dados do BDEP (Fonte: ANP, 2008).....	95
Figura 43 - Planilha com as principais informações sobre os campos descobertos nas águas rasas da Bacia de Campos, reunidas de diversas fontes (Elaboração do autor).....	98
Figura 44 - A área de águas rasas na Bacia de Campos, delimitada dentro do ArcGIS.....	100
Figura 45 - A área de águas rasas na Bacia de Campos, com os poços válidos mapeados.....	100
Figura 46 - Área de águas rasas da Bacia de Campos, com poços válidos, e cálculo da área em quilômetros quadrados (área total = 33.884Km <sup>2</sup> ) .....	101
Figura 47 - Campos descobertos, mapeados na Bacia de Campos, e destacados aqueles que residem em águas rasas.....	102
Figura 48 - Os poços descobridores e os campos descobertos na área de águas rasas da Bacia de Campos .....	102

Figura 49 - Campos descobertos, com informações associadas, oriundas dos dados do BDEP.....	103
Figura 50 - Construção do banco de dados dos campos, com informações de diversas fontes.....	104
Figura 51 - Área exaurida, considerando a área de influência de cada poço referente ao nível de probabilidade F90 (área menor, de maior probabilidade), totalizando 478Km <sup>2</sup> , ou menos de 1% da área investigada.....	106
Figura 52 - Área exaurida, considerando a área de influência de cada poço referente ao nível de probabilidade F50 (área correspondente à probabilidade mediana de campos a descobrir), totalizando 1554Km <sup>2</sup> , ou 5% da área investigada.....	107
Figura 53 - Área exaurida, considerando a área de influência de cada poço referente ao nível de probabilidade F10 (área maior, de menor probabilidade), totalizando 3466Km <sup>2</sup> , ou 10% da área investigada. Detalhe ao lado mostra como as áreas de influência de cada poço foram consolidadas.....	107
Figura 54 - Tela do GeoX, mostrando os campos que ainda podem ser descobertos, e a variação do tamanho de cada um, como pontos plotados a partir da curva de FSD, antes de ajustar pela área exaurida.....	109
Figura 55 - Tela do GeoX, mostrando os campos que ainda podem ser descobertos, e a variação do tamanho de cada um, como pontos plotados a partir da curva de FSD, após ajustar pela área exaurida.....	110
Figura 56 - Tela do GeoX mostrando o resultado gerado para a curva de <i>Discovery Sequence</i> , considerando apenas informações sobre alguns dos campos descobertos: não há tendência horizontal pronunciada.....	114

- Figura 57 - Parte da tela do GeoX mostrando o resultado para a curva de FSD, antes do ajuste por conta da área exaurida: o tamanho mínimo é de 1Mm<sup>3</sup> e o tamanho máximo é de aproximadamente 288Mm<sup>3</sup>..... 116
- Figura 58 - Parte da tela do GeoX mostrando o resultado para a curva de FSD, depois do ajuste por conta da área exaurida: o tamanho mínimo é de 1Mm<sup>3</sup> e o tamanho máximo é de aproximadamente 283Mm<sup>3</sup>..... 117
- Figura 59 - Parte da tela do GeoX que mostra como os tamanhos de campos esperados estão distribuídos..... 118
- Figura 60 - Gráfico gerado pelo GeoX, mostrando os volumes de acumulações totais a serem descobertas, esperadas para cada nível de probabilidade – para o nível de probabilidade de F10, o volume total esperado é de 2,77Bm<sup>3</sup> ..... 119
- Figura 61 - Gráfico gerado pelo GeoX, mostrando o número de acumulações a serem descobertas na área investigada, para cada nível de probabilidade – para o nível de probabilidade de F10, há 99 campos a serem descobertos..... 120
- Figura 62 - Tela do GeoX, mostrando a tabela gerada através de simulações Monte Carlo, com o tamanho de cada campo esperado (há 124 linhas na tabela)..... 121
- Figura 63 - Tela do GeoX, onde os campos que ainda podem ser descobertos são representados pelos pontos na curva, não preenchidos por descobertas..... 122
- Figura 64 - Tela do GeoX, chamada de *Rosy Future*, mostrando o resultado provável de novos esforços exploratórios na área investigada. Como a área não foi considerada madura, a região cor de rosa é relativamente grande em relação ao histórico exploratório passado..... 123

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativas do WA2000 para o TPS Lagoa Feia-Carapebus (Fonte: USGS, 2002).....	61
Tabela 2 - Informações para entrada de dados e possíveis fontes para as mesmas (Fonte: Caluyong, 2006).....	75
Tabela 3 - Comparação entre os resultados antes e depois de reduzir a área de calibração pelas áreas exauridas.....	108