

METODOLOGIA DE GERAÇÃO DE MAPAS DE QUALIDADE PARA APLICAÇÃO NA SELEÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PRODUÇÃO DE CAMPOS PETROLÍFEROS

Cavalcante Filho, J. S. de A.¹, Martini, R. F.² e Schiozer, D. J.³

UNICAMP, Cx. Postal 6122 Campinas, SP 13083-970, ¹sergio@dep.fem.unicamp.br,
²rogeriom@dep.fem.unicamp.br, ³denis@dep.fem.unicamp.br

Resumo – O mapa de qualidade é um conceito que integra todas as variáveis geológicas (como permeabilidade e porosidade) e inerentes ao fluido (como densidade e viscosidade), além da interação entre elas, resultando em um mapa bidimensional do potencial de produção; pode ser usado para determinar as melhores regiões para alocação dos poços, tanto para campos em desenvolvimento como para campos maduros. O método mais comum de geração do mapa usa simulações numéricas do reservatório considerando um poço produtor cuja posição é alterada em cada simulação. O tempo e o esforço computacional deste método são elevados, o que pode inviabilizar o processo. O objetivo deste trabalho é testar outros métodos de geração do mapa de qualidade, através de um estudo inicial para reservatórios teóricos e homogêneos. Os métodos testados são: (1) um poço por vez, (2) um grupo de quatro poços e (3) a abertura simultânea de poços distribuídos no reservatório usando poços injetores. Para interpolar valores para blocos não testados usou-se krigagem. O mapa gerado por simulação numérica usando um poço por vez foi considerado como referência por gerar resultados mais confiáveis com mais pontos simulados. Calculou-se o erro dos mapas em relação à referência e analisou-se a diferença entre os diversos métodos de geração de mapas, mostrando os que apresentam mais vantagens e aqueles que necessitam de um estudo mais aprofundado.

Palavras-Chave: Mapa de Qualidade; Estratégia de Produção; Simulação Numérica.

Abstract – Quality map is a concept that integrates all the geological variables (such as permeability and porosity) and fluid inherent ones (such as density and viscosity), besides the interaction between them, resulting in a two-dimensional map of production potential; it can be used to determine the best regions to allocate wells, either in reservoirs in their initial stage of production or in mature fields. The method most commonly used to generate maps uses several reservoir numerical simulations considering a unique producer well; its position is changed in order to cover the entire area of the reservoir grid, increasing considerably the time and computational effort needed, which could make the process impracticable. The purpose of this work is to test different map generation methods by using theoretical and homogeneous reservoir models as an initial investigation. Various methods were tested: (1) using a single well, (2) using a group of four wells, and (3) the simultaneous opening of wells distributed over the reservoir grid using injectors. The kriging method was used to interpolate the points which were not simulated. The method using a unique well was regarded as the reference, because it generates more reliable results and uses more grid points to construct the map. The error of the maps relative to the reference was calculated and the differences between the various techniques were analyzed; some of these techniques presented significant advantages, whereas others need a more careful study.

Keywords: Quality Map, Production Strategy, Numerical Simulation.

1. Introdução

As etapas de exploração, avaliação, desenvolvimento e gerenciamento da produção de um reservatório ocorrem em sequência. Primeiro a exploração realiza um longo e dispendioso estudo e análise de dados geofísicos e geológicos das bacias sedimentares. Após exaustivos estudos pode-se propor a perfuração de um poço, etapa que exige um grande investimento, a fim de comprovar a existência e a viabilidade de produção de hidrocarbonetos. Caso este poço exploratório obtenha sucesso, começa a fase de avaliação onde outros poços delimitadores são perfurados para diminuir a incerteza relativa à área do reservatório. O próximo passo consiste na elaboração de um estudo de viabilidade técnico-econômica. Caso este estudo forneça resultados satisfatórios pode-se iniciar a fase de desenvolvimento e efetuar altos investimentos, resultando assim na elaboração de um plano de exploração do campo para que este inicie a produção.

Na elaboração de um plano de exploração do campo, quando são sugeridas e analisadas diferentes estratégias de produção a fim de produzir o petróleo de forma eficiente, enquadra-se a utilização da ferramenta de auxílio à decisão denominada mapa de qualidade, que representa de maneira bidimensional as regiões de maior potencial de produção do campo. A principal aplicação do mapa de qualidade é a orientação na localização e na determinação do número de poços, tanto produtores quanto injetores.

2. Revisão Bibliográfica

Segundo Cruz (1999), o mapa de qualidade é definido como uma representação bidimensional do comportamento do reservatório e suas incertezas e usa um simulador de fluxo para integrar todos os parâmetros que afetam o escoamento dos fluidos por um reservatório heterogêneo, garantindo assim que sejam levadas em conta todas as interações entre eles. O mapa de qualidade tem sido utilizado recentemente como ferramenta de auxílio à decisão, tanto na elaboração de estratégias de drenagem iniciais quanto na otimização de estratégias pré-definidas, porém pouco se sabe sobre a influência que as maneiras de gerar o mapa têm sobre o formato do mesmo.

Nakajima (2003) gerou mapas de qualidade usando três diferentes métodos: simulação numérica, lógica fuzzy e analítico. Estes métodos foram aplicados no modelo modificado de um campo real, com inclusão de canais de alta permeabilidade e barreiras. Os mapas obtidos foram então usados em duas fases: na escolha da estratégia inicial, onde o número, espaçamento e configuração dos poços são determinados, e na otimização da estratégia previamente definida. Os poços utilizados por Nakajima (2003) para elaboração da estratégia de produção eram horizontais, e seu estudo inicial sobre a geração dos mapas mostrou a necessidade de um trabalho mais aprofundado nesta área.

Badru (2003) estudou a alocação de poços usando a ferramenta do mapa de qualidade. Seu trabalho foi dividido em duas partes. A primeira parte consistia no Mapa de Qualidade Básico (*Basic Quality Map* – BQM), onde a determinação dos valores da função objetivo de uma configuração de poços proposta dependia somente do inverso da distância ponderada em linha reta entre as células, ou seja, a função objetivo era calculada usando o grau de proximidade entre as células. O Mapa de Qualidade Modificado (*Modified Quality Map* – MQM) era uma combinação do método BQM e outros métodos de otimização direta, como o de algoritmo genético e *Polytope*. Esta metodologia usava as informações obtidas com o método BQM, porém, como aproximação para o cálculo da função objetivo, foram utilizados um simulador e a técnica de análise da curva de declínio.

Ierapetritou *et al* (1999) também utilizaram o conceito de qualidade sobre o reservatório, usando informações sobre o campo como a qualidade pontual e o geo-objeto, que expressam a produtividade e a conectividade do ponto. Baseado nessas informações, o problema de se selecionar a localização dos poços verticais foi formulado como um problema de otimização MILP (*Mixed-Integer Linear Programming*). Uma técnica de decomposição foi proposta a fim de resolver problemas reais baseados na aplicação dos cortes restritivos de qualidade.

3. Mapa de Qualidade – Método por Simulação Numérica

Desenvolvido por CRUZ (1999), o método de geração do mapa de qualidade por simulação é o mais comum e utiliza o resultado de diversas simulações de escoamento do fluido dentro do reservatório considerando a existência de apenas um poço produtor, completado em todas as camadas de óleo, com fechamento automático da camada quando o limite estabelecido de corte de água (ou gás) é atingido. O tempo de produção, variável dependente do tamanho e das características físicas da rocha reservatório, deve ser suficiente para que o campo seja produzido até o abandono definitivo, quando ele é avaliado como sub-comercial ou seco. Cada vez que um caso é simulado, a posição do poço produtor é alterada a fim de cobrir toda a área da malha horizontal que representa a rocha reservatório, como representado na Figura 1. A função objetivo usada neste trabalho para a construção do mapa é o valor presente líquido (VPL), porém podem ser usadas outras, tais como a produção de óleo (N_p).

Variações deste método foram testadas a fim de obter uma metodologia que apresente resultados confiáveis e utilizando tempos e esforços computacionais mais baixos. Uma destas variações foi a utilização de grupos de poços ao invés de um poço apenas, como representado esquematicamente na Figura 2. O principal cuidado com essa formulação é garantir uma distância mínima entre os poços suficiente para evitar que a influência mútua entre eles possa alterar os resultados do mapa obtido.

Além desta, testou-se também a variação de um poço de dois em dois, quatro em quatro e oito em oito blocos. Outra metodologia testada foi a abertura de diversos poços de posição fixa na malha, com a utilização de poços

injetores, que se caracteriza por necessitar de apenas uma simulação para a construção do mapa. O uso de poços injetores é justificado devido à rápida queda de pressão no reservatório quando diversos produtores são abertos simultaneamente no reservatório.

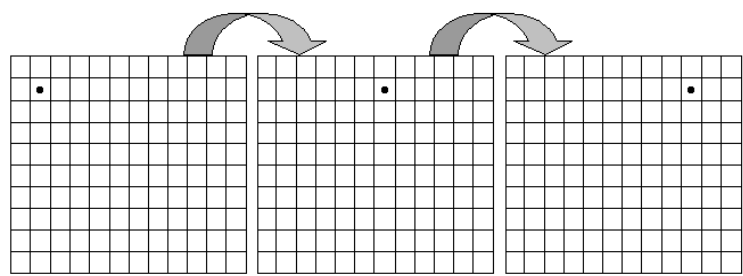


Figura 1. Variação da posição do poço (Nakajima, 2003).

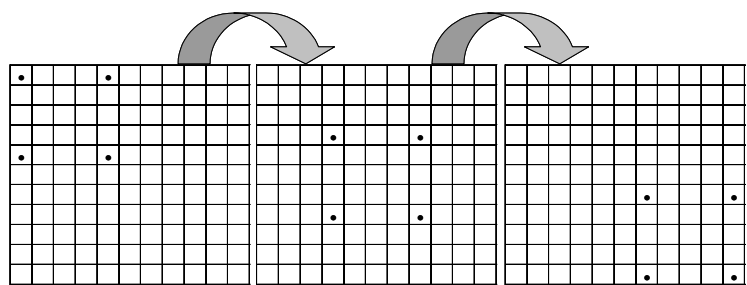


Figura 2. Variação da posição do grupo de poços.

4. Comparação dos Métodos

Foram utilizados dois modelos de reservatórios teóricos homogêneos (Figura 3), com permeabilidade horizontal de 500 mD, diferindo apenas em sua geometria e no tipo de aquífero (o caso A possui um aquífero analítico de fundo e o caso B, dois aquíferos analíticos laterais). O método da krigagem foi utilizado para interpolar os pontos da malha não calculados pelas simulações. Estes modelos foram escolhidos na primeira fase deste projeto pois possibilitam analisar se os mapas gerados refletem o comportamento esperado tendo em vista as características destes reservatórios. Esta fase é muito importante pois o conhecimento adquirido e a metodologia desenvolvida nesta etapa serão aplicados na fase seguinte a reservatórios heterogêneos e com configurações mais complexas, cujos comportamentos não podem ser preditos facilmente.

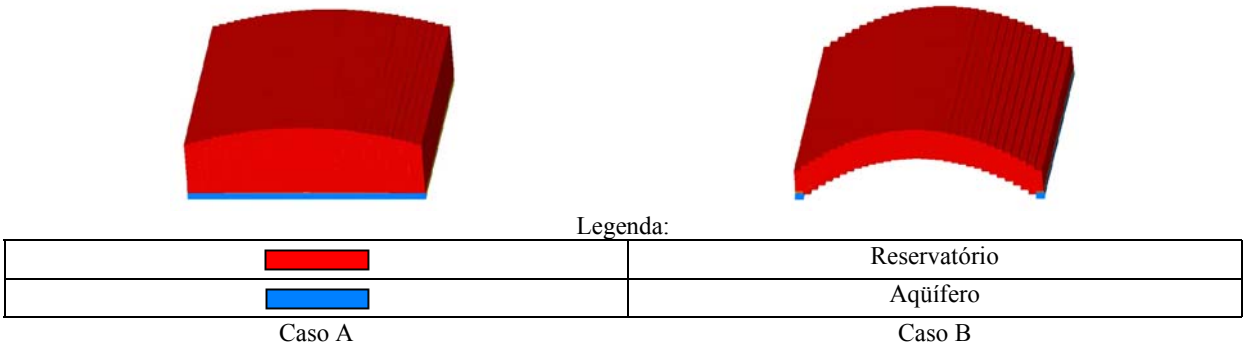


Figura 3. Modelos teóricos de reservatórios usados no trabalho.

Foi considerado como base o mapa gerado por simulações de apenas um poço, visto que este método evita a interferência de outros poços e a queda de pressão é menos acentuada. Calculou-se um erro relativo absoluto dos mapas em relação ao base, definido pela Equação (1), a fim de verificar o quanto cada mapa obtido se aproxima do mapa considerado mais preciso.

$$erro(\%) = \frac{\sum(M_{dif})}{\sum(M_{base})} \times 100 \quad (1)$$

onde:

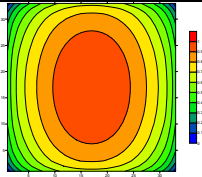
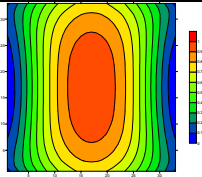
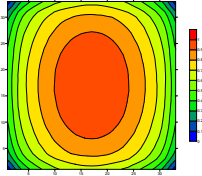
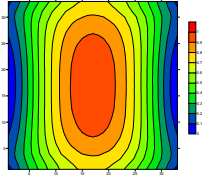
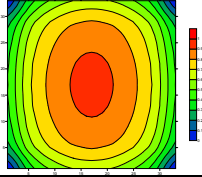
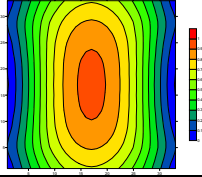
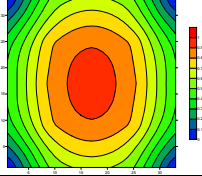
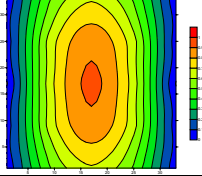
- M_{dif} : módulo da diferença entre os índices de qualidade do mapa base e do mapa a ser medido o erro; e,
- M_{base} : módulo do valor dos índices de qualidade do mapa base.

O cálculo deste erro visa auxiliar na comparação entre os mapas, que geralmente seria feita apenas por visualização, tornando possível construir um mapa com o nível de precisão exigido pelo problema, sem que tempo adicional seja perdido na construção do mesmo.

5. Resultados

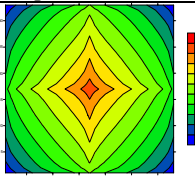
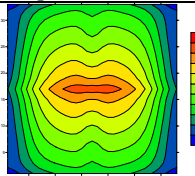
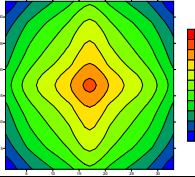
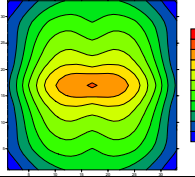
Na Tabela 1, podem ser observados os mapas obtidos pelo método de construção por simulação varrendo-se o reservatório com apenas um poço. A posição deste poço foi variada, primeiramente de um em um bloco (caso base), depois de dois em dois, de quatro em quatro e de oito em oito blocos. Os demais pontos não simulados foram obtidos por interpolação usando o método da krigagem. À medida que menos pontos são obtidos com a simulação, maior a influência do método de interpolação.

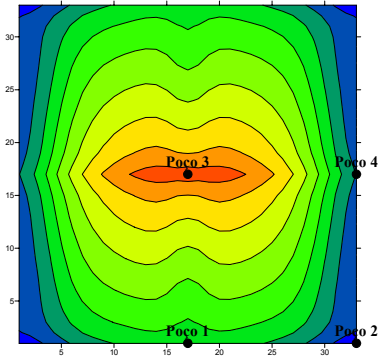
Tabela 1. Mapas de qualidade obtidos com um poço produtor e seus respectivos erros em relação ao mapa base.

	Caso A		Caso B	
	Mapa de Qualidade	Erro	Mapa de Qualidade	Erro
Mapa Base		0%		0%
2 em 2 blocos		2,31%		2,34%
4 em 4 blocos		9,74%		8,34%
8 em 8 blocos		13,98%		10,92%

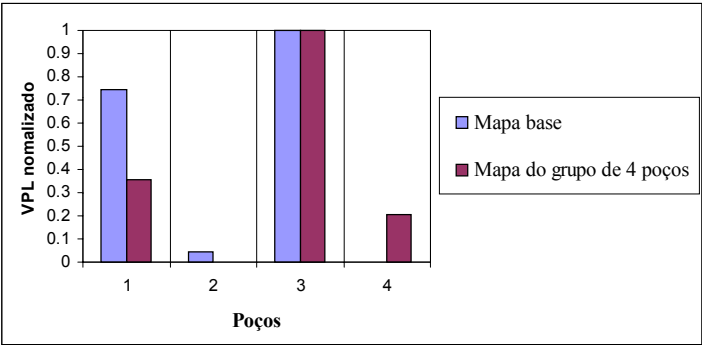
Na Tabela 2 observa-se uma outra variação do método por varredura onde se usa um grupo de quatro poços ao invés de um poço. Embora o número de simulações tenha sido reduzido, os mapas apresentaram um maior erro relativo. As regiões de maior potencial econômico continuaram, de uma maneira geral, com a mesma localização, porém os formatos visuais dos mapas diferem consideravelmente do mapa do caso base. Uma maior discrepância foi observada no caso B, onde a região de maior qualidade é bem menor e possui um formato bem adverso do mapa do caso base. A fim de investigar o motivo dessa diferença foi feita uma análise de um mapa do caso B (Figura 4 (a)) comparando-se o VPL de quatro poços com o VPL dos respectivos poços do caso base (Figura 4 (b)). Foi verificado que a função VPL não apresentou o mesmo comportamento: no mapa base a ordem decrescente dos VPL dos poços foi poço 3 > 1 > 2 > 4, enquanto que no caso do grupo de quatro poços a ordem mudou para poço 3 > 1 > 4 > 2. Este comportamento evidencia que a influência mútua dos quatro poços mudou o comportamento e a configuração do mapa. As melhores posições (poço 3 e poço 1) são mantidas mas as piores posições (poço 4 e poço 2) são alteradas. Observando-se com cuidado o mapa base do caso B (Tabela 1) pode-se confirmar que a região do vértice inferior direito do mapa (poço 2) apresenta uma qualidade ligeiramente maior do que a região da extrema direita central (poço 4).

Tabela 2. Mapas de qualidade obtidos com um grupo de 4 poços produtores e seus erros relativos ao mapa base.

	Caso A		Caso B	
	Mapa de Qualidade	Erro	Mapa de Qualidade	Erro
1 em 1 bloco		35,63%		28,22%
4 em 4 blocos		37,04%		32,66%



(a)

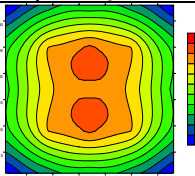
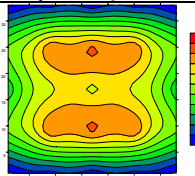
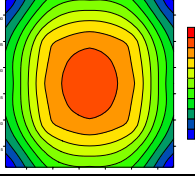
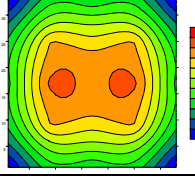


(b)

Figura 4. Estudo de poços para o caso de simulação numérica por varredura com o grupo de quatro poços.

Na Tabela 3 são mostrados dois casos de mapas gerados por simulação abrindo-se poços produtores e injetores simultaneamente. No primeiro caso os poços produtores e injetores estão distribuídos em linha e de forma intercalada pela superfície do reservatório, enquanto que no segundo caso é obedecida a configuração *five-spot*. O caso A apresentou erros relativos menores que o caso B. Em ambos os casos o melhor esquema de poços foi o *five-spot*, que apresentou um menor erro. Cabe salientar que os poços injetores servem apenas como pontos de injeção de pressão por representarem apenas gastos e não lucro (VPL negativo).

Tabela 3. Mapas de qualidade obtidos com poços produtores e injetores (configuração *five-spot* e intercalada) abertos simultaneamente e seus erros relativos ao mapa base.

	Caso A		Caso B	
	Mapa de Qualidade	Erro	Mapa de Qualidade	Erro
25 prod. e 20 inj. (Intercalados)		21,40%		38,36%
25 prod. e 16 inj. (Five-Spot)		19,26%		30,20%

Observando-se a Tabela 4 pode-se comparar quantas simulações foram necessárias para cada método, verificando assim que o tempo de simulação pode ser drasticamente reduzido.

Tabela 4. Números de simulação para cada método aplicado

Método Utilizado		Número de simulações*	Erros	
			Caso A	Caso B
Varredura	1 em 1	1089	0%	0%
	2 em 2	289	2,31%	2,34%
	4 em 4	81	9,74%	8,34%
	8 em 8	25	13,98%	10,92%
Grupo de 4 poços	1 em 1	289	35,63%	28,22%
	4 em 4	25	37,04%	32,66%
Abertura Simultânea	Intercalado	1	21,40%	38,36%
	Five-Spot	1	19,26%	30,20%

*Relativos aos casos A e B (malha com 33x33x10 blocos).

6. Conclusões

Para o método de geração do mapa de qualidade por varredura (1 poço):

- O mapa de qualidade pode ser gerado em menor tempo, sem comprometer demasiadamente sua precisão, ao movimentar o poço produtor pulando alguns blocos. O mapa gerado com o poço produtor sendo movido de dois em dois blocos apresentou, para o caso estudado, um erro menor que três por cento e menos da metade do número de simulações do caso base.
- Para casos onde um nível de precisão menor é necessário, o mapa pode ser gerado ainda com o poço produtor sendo movido de quatro em quatro blocos, pois o erro relativo é menor que 10% e o número de simulações é quase 90% menor.
- Quanto menor o número de pontos da malha simulados, maior a influência do método de interpolação, o que resulta em um mapa menos condizente com a realidade do reservatório.

Para o método de geração do mapa de qualidade usando o grupo de quatro poços:

- O número de simulações é bem reduzido e mais pontos são simulados, porém o mapa apresenta um alto erro relativo devido à mudança na distribuição da pressão do reservatório ocasionada pela influência entre poços.
- No presente trabalho procurou-se posicionar os poços a uma distância suficientemente grande para evitar a influência mútua entre os poços; porém maiores estudos devem ser feitos sobre este assunto.

Para o método de geração do mapa de qualidade usando abertura simultânea de poços produtores e injetores:

- A grande vantagem deste método é utilizar apenas uma simulação e por essa praticidade pode ser uma alternativa rápida de consulta ao mapa de qualidade.
- No caso A e no caso B, o mapa gerado com os poços intercalados apresentou um erro maior do que aquele gerado com a configuração *five-spot*. A maior diferença entre esses erros aconteceu no caso B, provavelmente devido às diferenças de geometria do reservatório e da disposição do aquífero.

Mais testes estão sendo feitos para propor uma metodologia que possa gerar mapas confiáveis sem necessitar de um tempo (e esforço computacional) excessivo para estes casos, além de outros modelos que fazem parte da etapa seguinte do trabalho.

7. Referências

- BADRU, Oluwatoyin: “Well-Placement Optimization Using the Quality Map Approach”, Tese de Mestrado, Universidade de Stanford, EUA, 2003.
- CRUZ, P. S., HORNE, R. N., DEUTSCH, C. V., “The Quality Map: A Tool for Reservoir Uncertainty Quantification and Decision Making”, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, EUA, SPE 56578, Out. 3-6, 1999.
- IERAPETRITOU, M. G., FLOUDAS, C. A., VASANTHARAJAN, S., CULLICK, A. S.: “Optimal Location of Vertical Wells: Decomposition Approach”, AIChE Journal, Vol. 45, No. 4, pp. 844-859, Abr. 1999.
- NAKAJIMA, L., “Otimização de Desempenho de Poços Horizontais no Desenvolvimento de Campos de Petróleo”, Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 2003.