

## 8

### Exemplos

Dois reservatórios sintéticos foram construídos para exemplificar a aplicação da metodologia e avaliar a contribuição do atributo  $V_s$  na previsão de pressão de poros. Esses reservatórios apresentam características idênticas, sendo que a única diferença entre eles é o estado de consolidação da rocha (caso 1: rocha não consolidada, caso 2: rocha consolidada).

Observe que os exemplos são referentes a campos em desenvolvimento, onde existem poços perfurados que permitem a obtenção de informações *a priori* sobre as propriedades do reservatório.

#### 8.1.

#### Características gerais do reservatório

A configuração estrutural do reservatório é apresentada na Figura 20. A rocha-reservatório é constituída de um arenito sujo, que se encontra envolvido por folhelhos de baixíssima permeabilidade e que ainda é atravessado por uma falha selante. Devido a essas condições do contorno, pode-se dizer que o reservatório é potencialmente constituído de dois compartimentos de pressão (Bradley e Powley, 1994).

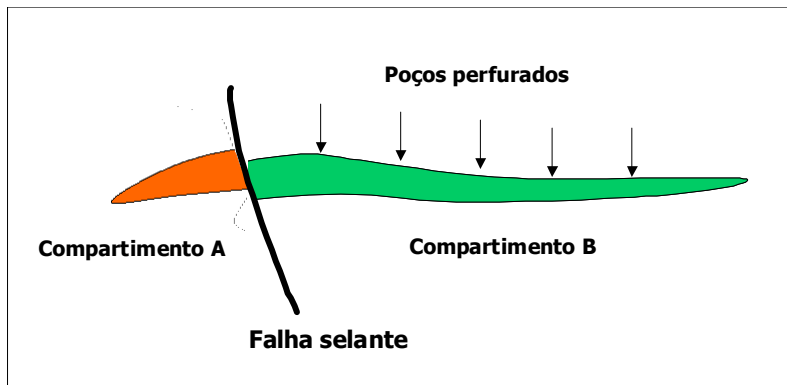


Figura 20. Representação estrutural do reservatório. Uma falha selante divide o reservatório em dois compartimentos de pressão distintos.

A profundidade média do reservatório é de 1000 metros (*onshore*), o que corresponde a uma sobrecarga de 23 MPa e a uma pressão hidrostática de 10 MPa. A temperatura é de 40 °C.

Observe que no compartimento B, apresentam-se 5 poços perfurados e analisados, sendo que as pressões de poros encontradas nos poços se referem a uma pressão hidrostática. Já no compartimento A, não existe nenhum poço perfurado e desconhece-se a pressão de poros, que é alta (20.7 MPa). Sendo assim, o principal desafio da metodologia é a previsão da pressão de poros que ocorre no compartimento A.

### 8.1.1.

#### Distribuição de propriedades no reservatório

O topo do reservatório é utilizado para demonstração da metodologia (Figura 21). O reservatório foi discretizado em células de 100m x 100m x 20m (onde 20m corresponde à altura: eixo Z)<sup>9</sup>, sendo que no interior de cada célula as propriedades da rocha, fluido e tensões são consideradas constantes.

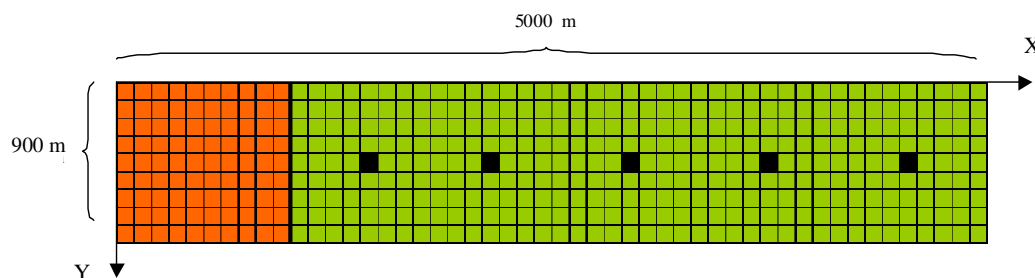


Figura 21. Representação do topo do reservatório. As células em preto indicam a localização dos poços já perfurados. A região em laranja corresponde ao compartimento A, que apresenta pressão de poros de 20.7 MPa, enquanto que a região verde representa o compartimento B, onde a pressão de poros é hidrostática.

Na Figura 22, apresentam-se os valores de porosidades e conteúdos de argila assumidos para cada célula. A ocorrência de maiores porosidades na extrema direita do reservatório é proposital, pois se deseja contrastar anomalias de velocidades

<sup>9</sup> Em um caso real, as dimensões das células são determinadas pela resolução da inversão sísmica.

causadas por variação de porosidade com aquelas causadas por altas pressões de poros (que ocorrem no compartimento à esquerda).

Os fluidos presentes nos poros da rocha correspondem a misturas homogêneas de óleo (grau API = 57) e salmoura (salinidade de 25000 ppm), sendo que as proporções dessas misturas variam ao longo do reservatório (Figura 23).

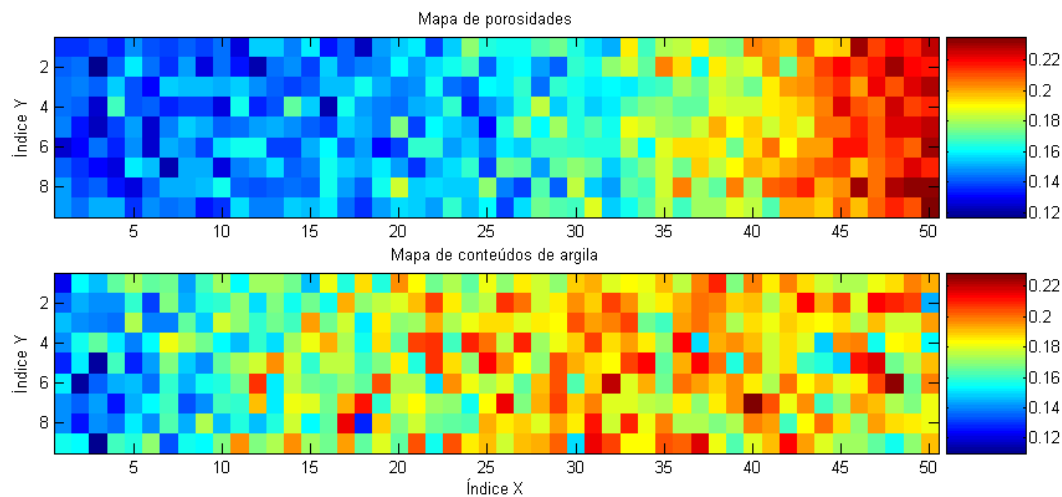


Figura 22. Mapas de porosidades e conteúdos de argila no reservatório.

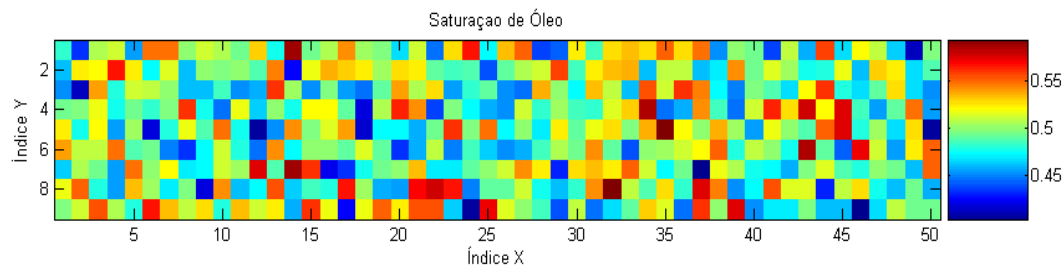


Figura 23. Distribuição de fluidos no reservatório. Proporções de óleo nas misturas de salmoura e óleo.

## 8.2.

### Caso 1: Arenitos não consolidados

#### 8.2.1.

#### Simulação de atributos sísmicos

Seguindo a formulação do problema direto (capítulo 3), que neste caso utiliza o modelo de rocha não consolidada apresentado no capítulo 4 (equações (57) e (58) no

lugar das equações (20) e (21)), obtém-se, a partir das propriedades e tensões atribuídas a cada célula, os mapas de  $V_p$  e  $V_s$  reais no reservatório (Figura 24).

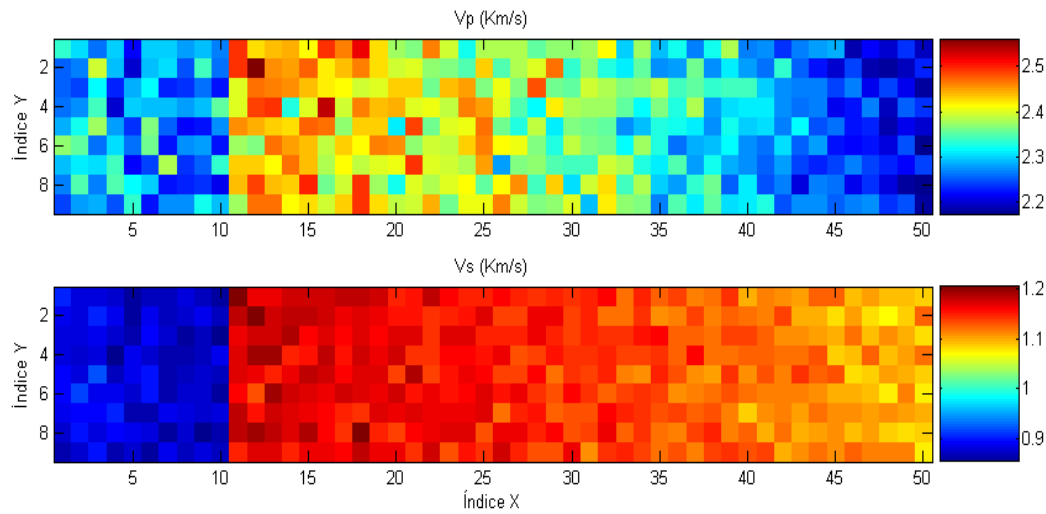


Figura 24. Mapas de  $V_p$  e  $V_s$  reais geradas através da formulação do problema direto, que neste caso utiliza o modelo de rochas não consolidadas descrito no item 4.1.

Para simular os atributos sísmicos disponíveis para a previsão de pressão de poros, adiciona-se ruídos pseudo-aleatórios às velocidades reais (Figura 25). Os ruídos adicionados seguem distribuições Gaussianas de média zero e desvios padrões correspondentes a erros relativos percentuais<sup>10</sup> de 10% para  $V_p$  e 20% para  $V_s$ .

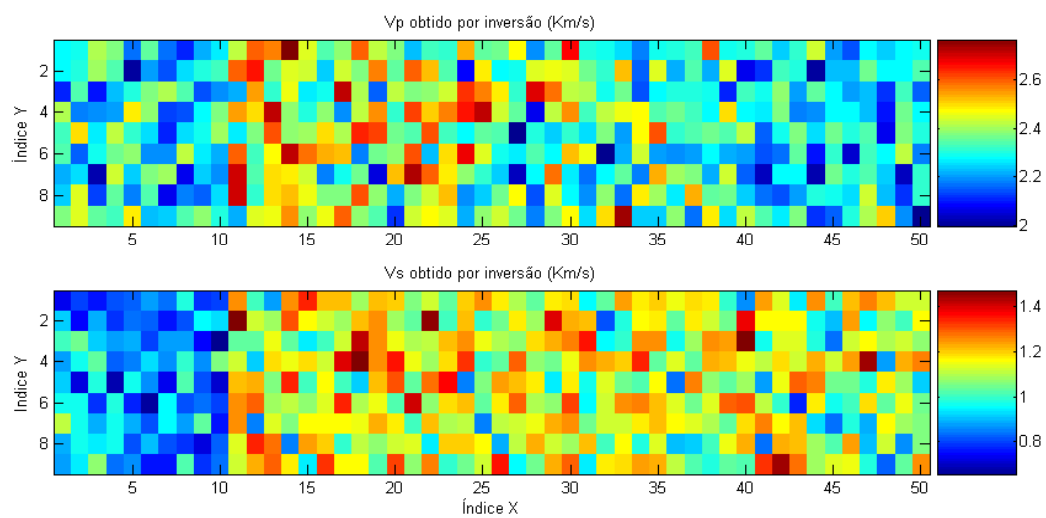


Figura 25. Mapas dos atributos sísmicos  $V_p$  e  $V_s$  (velocidades reais corrompidas por erros pseudo-aleatórios).

<sup>10</sup> Para a definição de erro relativo percentual, ver anexo 1.

Note que as observações realizadas nas análises paramétricas do modelo (capítulo 5) podem ser estendidas para esses mapas. Comparando os mapas de  $V_p$  e  $V_s$  entre si, observa-se que a condição de alta pressão de poros no compartimento à esquerda produz um maior impacto no mapa de  $V_s$ , o que é explicado pela maior sensibilidade desse atributo perante a variação de pressão diferencial, sobretudo em um estado de baixa pressão diferencial (como é o caso).

No mapa correspondente à  $V_p$ , observa-se que baixas velocidades são ocasionadas tanto por altas porosidades (extrema direita do reservatório) quanto por altas pressões de poros. Vale lembrar que o modelo utilizado para rochas não consolidadas apresenta uma influência relativamente menor da porosidade em  $V_s$  (ver Figura 12).

### 8.2.2.

#### Exemplo de aplicação da metodologia

(Observe neste momento que as características gerais do reservatório (item 8.1) não são mais conhecidas).

As informações disponíveis para a previsão de pressão de poros são: dados de poços, atributos obtidos por inversão sísmica ( $V_p$  e  $V_s$ ) e amostras retiradas dos arenitos da região, que permitem a calibração do modelo de física de rochas.

#### 8.2.2.1.

##### Calibração do modelo

O primeiro passo da metodologia corresponde à calibração do modelo de física de rochas (equações (12) e (13)) para os arenitos da região, o que é feito através de ensaios laboratoriais em amostras secas retiradas do reservatório. Para exemplificar este procedimento, criou-se artificialmente um conjunto de 20 amostras de rocha (com diferentes porosidades e conteúdos de argila), e, através do modelo apresentado no item 4.1 (resumido pelas equações (59) e (60)), simulou-se ensaios do tipo velocidade vs pressão diferencial para cada amostra (resultados no anexo 2). A partir desses resultados, aplicou-se o processo de calibração proposto por Eberhart-Phillips

et al. (1989), obtendo os coeficientes das equações (12) e (13) (Tabela 3). Observe que no exemplo apresentado, as incertezas associadas a esses parâmetros não foram consideradas, o que pode ser relevante em casos reais.

Tabela 3. Valores ótimos dos coeficientes de calibração do modelo.

$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
2.180	-1.063	-0.701	0.745	21.0
$s_0$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$
1.53	-0.741	-0.504	0.5194	21.0

### 8.2.2.2.

#### Obtenção de Informações *a priori*

O segundo passo da metodologia consiste em reunir as informações existentes sobre os parâmetros de rocha, fluido e estado de tensões ao longo do reservatório.

#### A) Informações sobre porosidade e conteúdo de argila

As informações *a priori* sobre as porosidades ( $\phi$ ) e os conteúdos de argila ( $C$ ) ao longo do reservatório são obtidas através de uma extrapolação via krigagem dos valores obtidos nos poços perfurados<sup>11</sup>. Visando a simplificar o problema, assume-se que nas células atravessadas pelos poços, conhecem-se os valores médios de  $\phi$  e  $C$  (Tabela 4). (Ou seja, através de análises em perfis e testemunhos, já foram calculados  $\phi$  e  $C$  representativos para o volume dessas células).

Tabela 4. Células com valores conhecidos de  $\phi$  e  $C$ .

Índices [X, Y]	Coordenada X	Coordenada Y	$\phi$	$C$
Célula [14, 5]	1450	450	14.7	17.8
Célula [22, 5]	2250	450	16.0	20.7
Célula [29, 5]	2950	450	17.9	20.3
Célula [37, 5]	3750	450	18.4	21.3
Célula [45, 5]	4550	450	20.6	14.8

<sup>11</sup> Observe que teoricamente a krigagem é um método de interpolação. Seu uso para extrapolação de propriedades é utilizado na tentativa de obter pelo menos uma idéia sobre as propriedades no compartimento A.

A partir desses dados, modelou-se a variabilidade espacial das propriedades  $\phi$  e  $C$  no reservatório através de variogramas experimentais isotrópicos. No caso da variável porosidade, o variograma ajustado foi um do tipo Exponencial, com os parâmetros Patamar (*Sill*) = 20 e Alcance (*Range*) = 4500m. Já para a variável conteúdo de argila, o variograma ajustado foi um do tipo Esférico, com Patamar = 3 e Alcance = 2500 m (Figura 26).

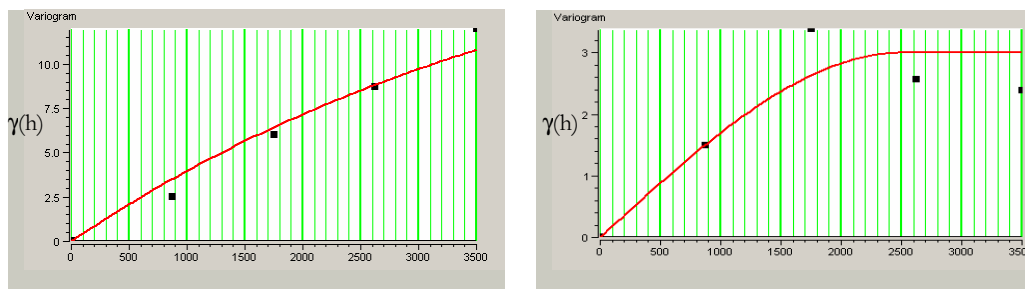


Figura 26. Ao lado esquerdo, o variograma ajustado aos dados de porosidade. Ao lado direito, o variograma ajustado aos dados de conteúdo de argila. O software GEOSTAT (2004) foi utilizado.

Os resultados da krigagem ordinária, valores médios e desvios padrões, são respectivamente dados na Figura 27 e na Figura 28. Observe que, por exemplo, no caso da porosidade, o método consegue mapear, mesmo que de forma aproximada, a crescente variação da esquerda para direita do valor deste parâmetro, o que auxiliará a inversão de pressão de poros. Observe também como as incertezas das estimativas aumentam ao se afastar dos poços existentes (Figura 28). É intuitivo também que maiores incertezas na previsão ocorram ao se afastar dos poços existentes.

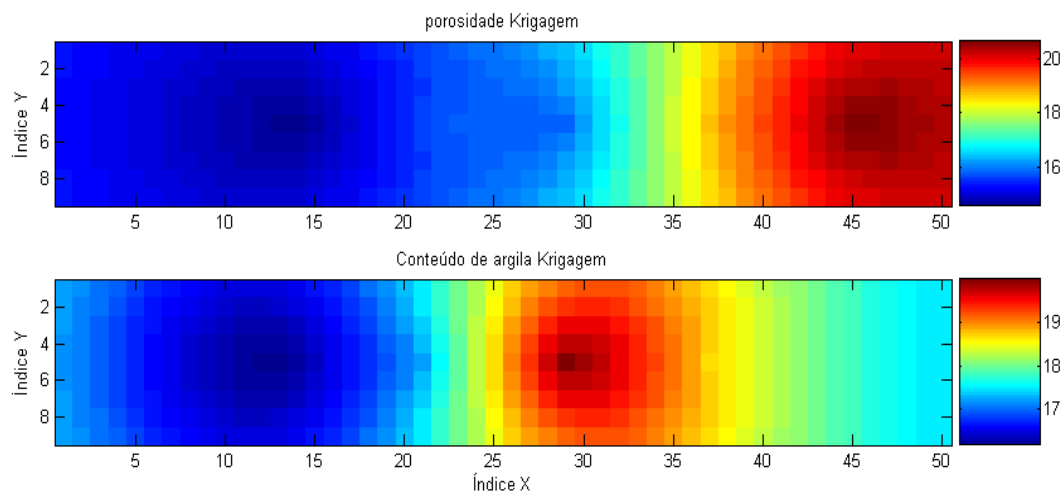


Figura 27. Mapas de porosidades (%) e conteúdos de argila (%) gerados por Krigagem.

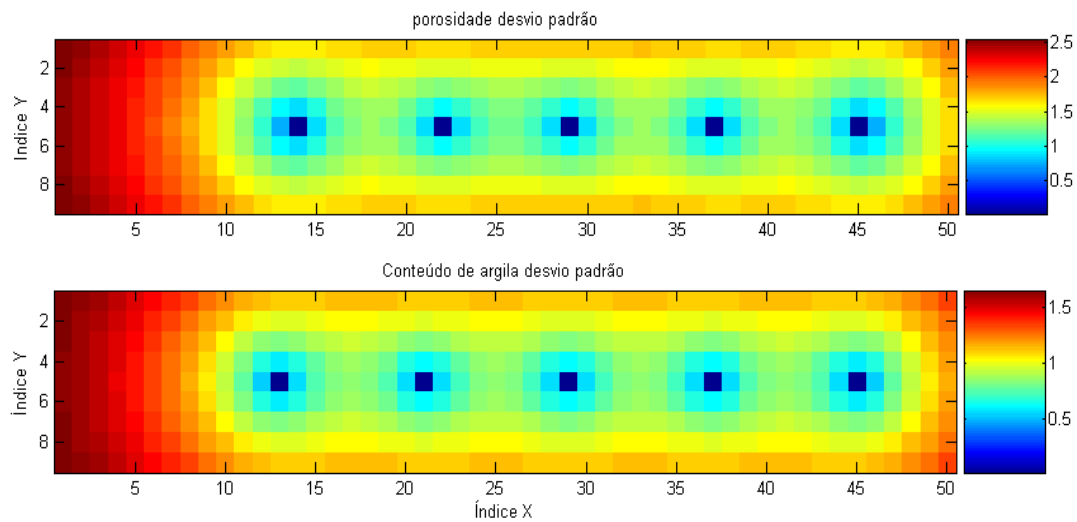


Figura 28. Mapa de desvios padrões relativos à Krigagem. As incertezas crescem com o afastamento dos poços.

Como foi visto no item 7.2.3 desta tese, Doyen et al. (2004) propõem o uso de distribuições Gaussianas caracterizadas pelas médias ( $\mu$ ) e desvios padrões ( $\sigma$ ) obtidos na krigagem para estimar os valores de porosidade e conteúdo de argila ao longo de reservatórios. Nesta tese, optou-se por caracterizar essas informações através de distribuições Uniformes, com valores limites dados pelo intervalo  $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ .

### **B) Informações sobre os fluidos de saturação**

Neste exemplo, supõe-se que é previamente sabido que todo o reservatório é saturado por líquidos (não existem gases), e que esses líquidos podem ser modelados através de misturas homogêneas de óleo e salmoura. Assumindo que a fração de água conata é de 30%, opta-se por caracterizar as incertezas quanto à parcela de óleo na mistura pela situação de maior incerteza possível: uma distribuição Uniforme entre 0% e 70%.

Supõe-se também que as características do óleo (grau API) e da salmoura (salinidade) foram previamente analisadas através dos fluidos produzidos pelos poços perfurados. Para caracterizar o grau API do óleo, considerou-se uma distribuição Uniforme entre 55 e 59. Para a salinidade da salmoura, considerou-se uma



distribuição Uniforme entre 23000 e 25000 ppm. A temperatura do reservatório foi considerada conhecida, 40°C.

### **C) Informações sobre o estado de tensões**

De forma simplificada, caracteriza-se as informações *a priori* sobre o parâmetro sobrecarga através de uma distribuição Gaussiana, de média 23 MPa e desvio padrão 0.5 MPa. Para a distribuição *a priori* da pressão de poros, assume-se que seu limite inferior é dado pela pressão hidrostática (10 MPa), enquanto que o limite superior equivale a 95% da tensão de sobrecarga. Devido a dependência do limite superior da pressão de poros com o valor de sobrecarga (que também é uma variável aleatória), a distribuição *a priori* da pressão de poros não constitui exatamente uma distribuição Uniforme, conforme pode ser visto na Figura 29.

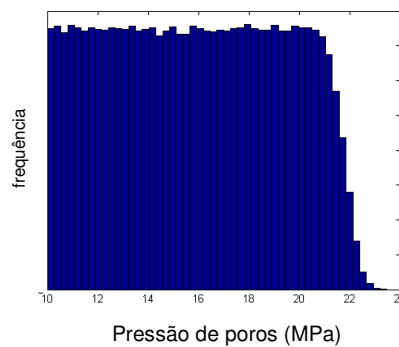


Figura 29. Histograma representativo da distribuição *a priori* de pressão de poros.

### **D) Informações sobre os minerais da rocha**

As propriedades dos minerais que constituem o grão da rocha reservatório foram consideradas previamente conhecidas. Os valores utilizados no exemplo correspondem aos valores apresentados por Goldberg e Gurevich (1998), dados no item 5.1 (pág. 51).

### 8.2.2.3.

#### Inversão para pressão de poros

O terceiro e último passo da metodologia consiste em aplicar o algoritmo de inversão (capítulo 6), que permite unificar as informações *a priori* sobre os parâmetros do modelo com os atributos sísmicos disponíveis, inferindo a pressão de poros.

Observa-se que ainda é necessário definir as incertezas associadas aos atributos sísmicos disponíveis. Neste exemplo, considerou-se 10% de incertezas para  $V_p$  e 20% de incertezas para  $V_s$  (erros relativos percentuais), sendo que estas incertezas foram consideradas não correlacionadas.

Na Figura 30, apresentam-se alguns resultados obtidos pela inversão: os mapas das médias e das modas das distribuições *a posteriori* de pressão de poros em cada célula do reservatório (um mapa com as pressões de poros reais é também apresentado para comparação). Observa-se que ambos os estimadores foram capazes de identificar o compartimento sobrepressurizado e, de certa forma, quantificar a pressão de poros atuante. Ao se comparar as médias e as modas com os reais valores de pressão de poros, observa-se que a moda se apresenta como um melhor estimador de pressões de poros, apesar do mapa correspondente (às modas) se apresentar de forma mais heterogênea.

Na Figura 31, apresenta-se o mapa de desvios padrões associados às pressões de poros estimadas (observe que o desvio padrão da distribuição *a priori* é de 3.43 MPa). Observa-se também que as incertezas avaliadas na região de altas pressões de poros são menores, o que é explicado pelo fato de  $V_p$  e  $V_s$  serem mais sensíveis à variação de pressões diferenciais em um estado de baixas pressões diferenciais (altas pressões de poros). Observe também no compartimento A, que ao se afastar dos poços existentes (compartimento B), que existe um aumento das incertezas na previsão, o que é explicado pelas maiores incertezas nos valores de porosidade e conteúdo de argila estimados pela krigagem.

Na Figura 32, apresenta-se o mapa de probabilidades de ocorrência de pressões de poros acima de uma pressão considerada crítica para a perfuração (15 MPa, por exemplo). Também através desta análise fica evidente a região do reservatório que apresenta pressões de poros elevadas.

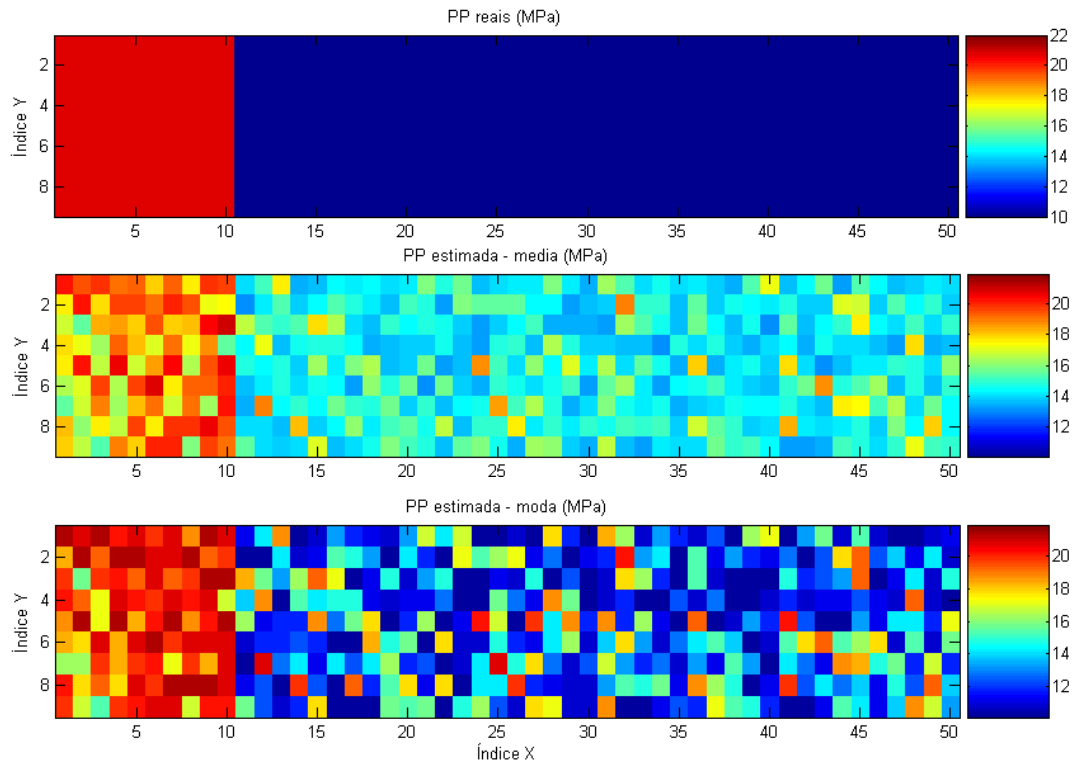


Figura 30. Mapa dos valores reais das pressões de poros e das médias e modas das distribuições *a posteriori* de pressão de poros obtidas pela inversão.

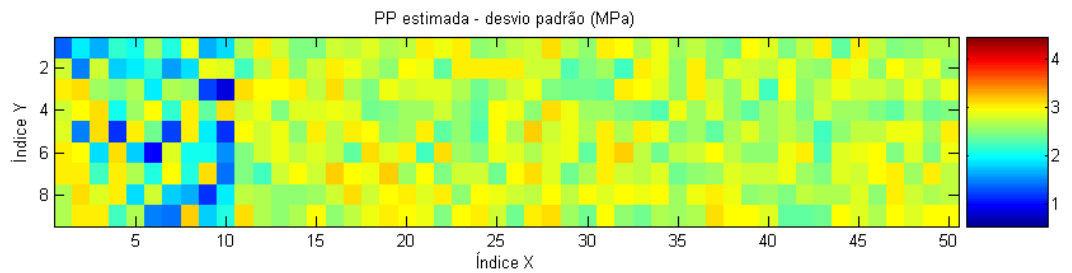


Figura 31. Mapa dos desvios padrões das distribuições *a posteriori* de pressão de poros.

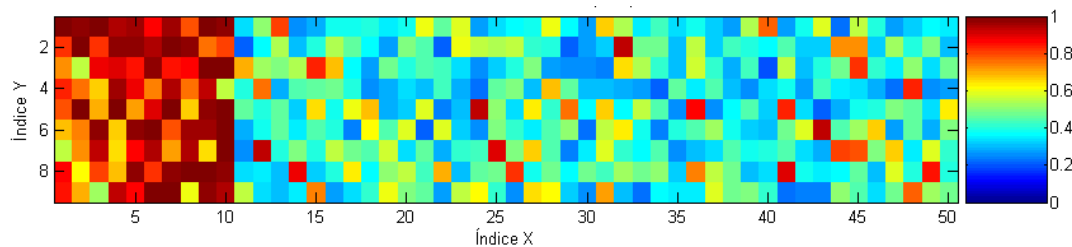


Figura 32. Probabilidade avaliada de ocorrer uma pressão de poros acima de 15 MPa.

Dando prosseguimento à análise, estudam-se os resultados obtidos em duas células específicas do reservatório: a célula [8, 4] (índice X = 8 e índice Y = 4), que se

encontra no compartimento A, e a célula [12, 5], que se encontra no compartimento B<sup>12</sup> (Figura 33 e Tabela 5).

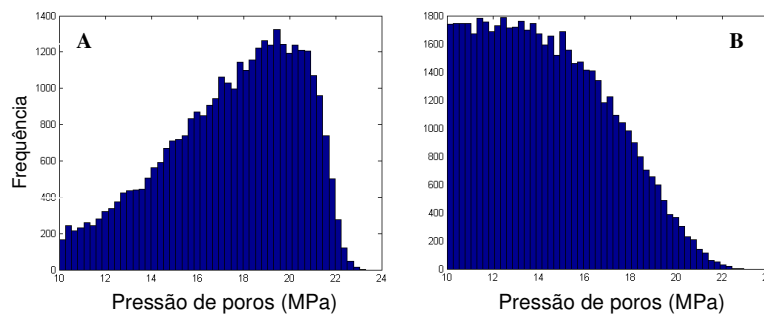


Figura 33. Distribuições *a posteriori* na célula [8, 4] (fig. A) e na célula [12, 5] (fig. B).

A primeira observação a ser realizada corresponde à grande magnitude das incertezas associadas às pressões estimadas. Observe nos histogramas, que todos os valores de pressões de poros estabelecidos *a priori* são plausíveis (compare com a distribuição *a priori* na Figura 29).

Observa-se também que os histogramas da célula [8, 4] e da célula [12,5] tem formatos diferentes (Figura 33). No caso de pressão alta (célula [8, 4]), a moda é bem definida e se apresenta como um bom estimador da pressão de poros. No caso de pressão normal (célula [12,5]), a moda não é tão bem definida (não existe um pico bem definido no histograma, e sim uma faixa de valores de pressão de poros com probabilidades máximas muito semelhantes). Observe que este fato é bastante verossímil, já que variações de pressões nessas situações influenciam pouco nas velocidades.

Analisando a Tabela 5, observa-se que os desvios padrões são menores em uma situação de alta pressão de poros, como foi debatido.

---

<sup>12</sup> Observa-se que a célula [8, 4] possui as seguintes velocidades reais:  $V_p = 2.228$  Km/s e  $V_s = 0.876$  Km/s. Através da inversão sísmica (simulada por adição de ruído às velocidades reais), estimou-se  $V_p = 2.148$  Km/s e  $V_s = 0.998$  Km/s, com incertezas definidas pelos respectivos desvios padrões: 0.124 Km/s e 0.115 Km/s. Já a célula [12,5] possui as seguintes velocidades reais:  $V_p = 2.447$  Km/s e  $V_s = 1.164$  Km/s, e, através da inversão sísmica, estimou-se  $V_p = 2.377$  Km/s e  $V_s = 1.226$  Km/s, com os respectivos desvios padrões: 0.137 Km/s e 0.142 Km/s.

Tabela 5. Parâmetros das distribuições *a priori* e *a posteriori* nas células [8, 4] e [12, 5].

	<i>a priori</i>	<i>a posteriori</i> Célula [8, 4]	<i>a posteriori</i> Célula [12, 5]
Média (MPa)	15.92	17.44	14.32
Moda (MPa)	Indefinida	19.4	Mal-definida
Desvio Padrão (MPa)	3.43	2.90	2.75
Intervalo de Confiança - 90% (MPa)	11.2 - 20.6	13.2 – 20.9	10.8 – 18.1

#### 8.2.2.4.

#### Contribuição de $V_s$ na previsão de pressões de poros

Para analisar a contribuição de  $V_s$  neste exemplo de previsão, realiza-se uma nova inversão considerando somente o atributo  $V_p$ . As Figuras 34, 35, 36 e 37 apresentam esses resultados, sendo que na parte inferior de cada figura, repetem-se os resultados das inversões realizadas através de  $V_p$  e  $V_s$  para comparação.

Através da consideração de  $V_s$ , estimou-se melhores modas (Figura 34), melhores médias (Figura 35), e também observou-se redução significativa de incertezas associadas às pressões estimadas (Figura 36 e Figura 37).

Analisando melhor essas figuras, constata-se que  $V_s$  não apenas contribuiu na previsão, mas que esta foi praticamente crucial para o sucesso da previsão. Ao se considerar somente  $V_p$  na inversão, muito pouco se pôde inferir sobre a pressão de poros no reservatório. Ou seja, as informações *a posteriori* sobre pressão de poros são muito semelhantes às informações *a priori*, o que pode ser constatado pelas médias e desvios padrões obtidos nas Figuras 35 e 36 (mapas superiores), que são bem próximos da média e do desvio padrão da distribuição *a priori* ( $\mu = 15.92$  MPa,  $\sigma = 3.43$  MPa).

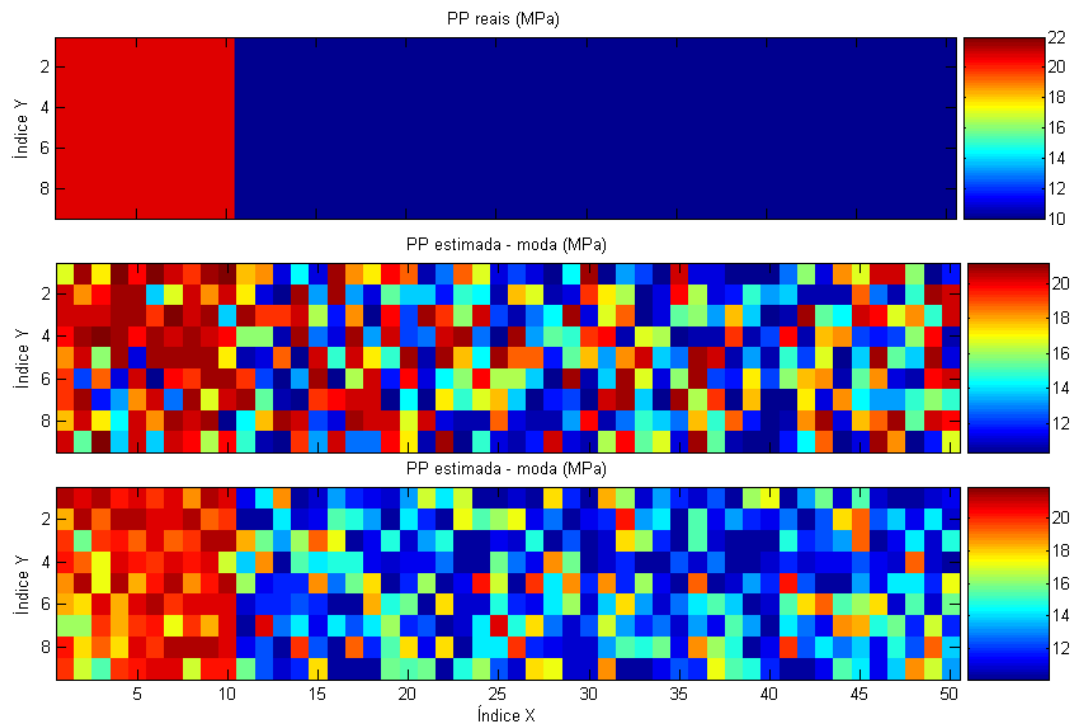


Figura 34. Pressões de poros reais (mapa superior) e as modas das distribuições *a posteriori* de pressão de poros obtidas nas inversões. Mapa central: inversão através de  $V_p$ , mapa inferior, inversão através de  $V_p$  e  $V_s$ .

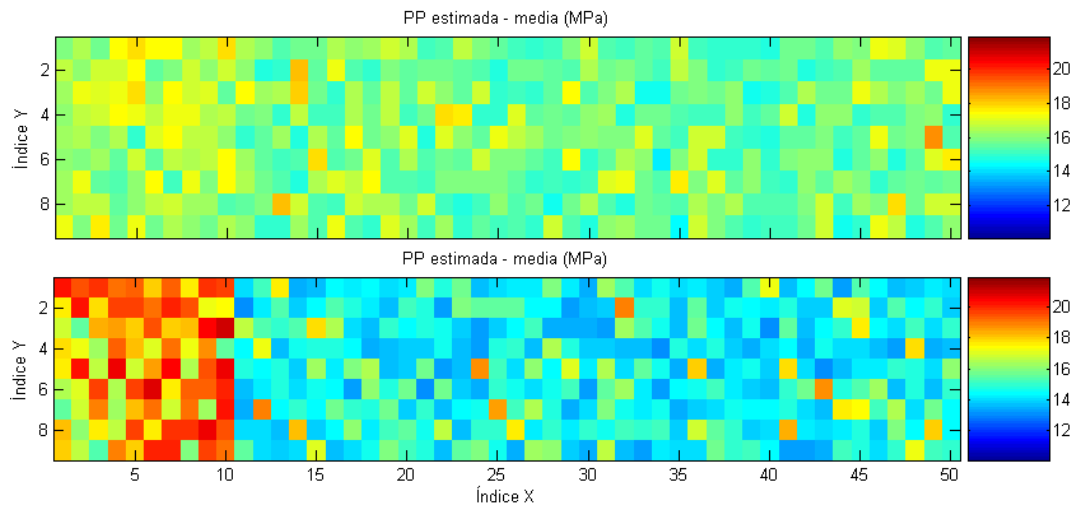


Figura 35. Médias das distribuições de pressão de poros obtidas. Mapa superior: inversão através de  $V_p$ , mapa inferior, inversão através de  $V_p$  e  $V_s$ .

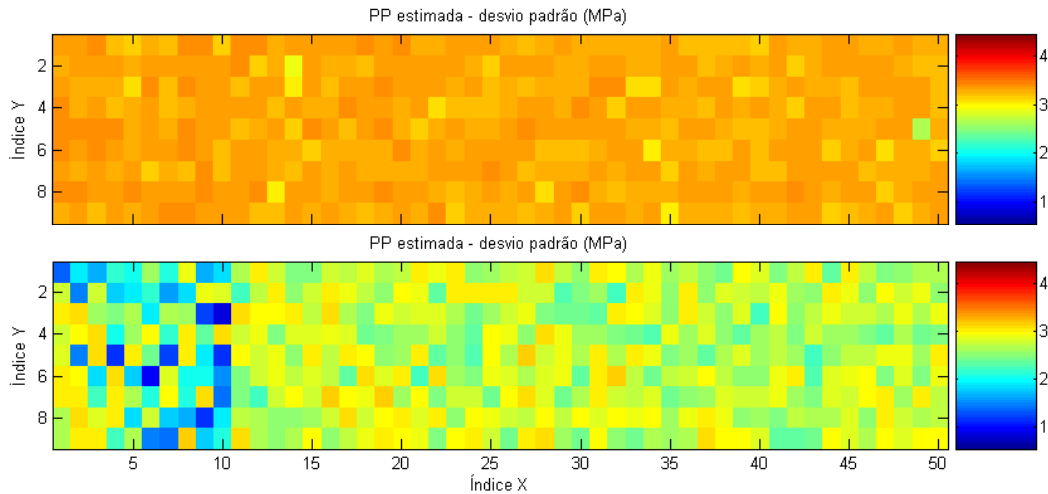


Figura 36. Desvios padrões das pressões de poros invertidas. Mapa superior: inversão através de  $V_p$ , inferior, inversão através de  $V_p$  e  $V_s$ .

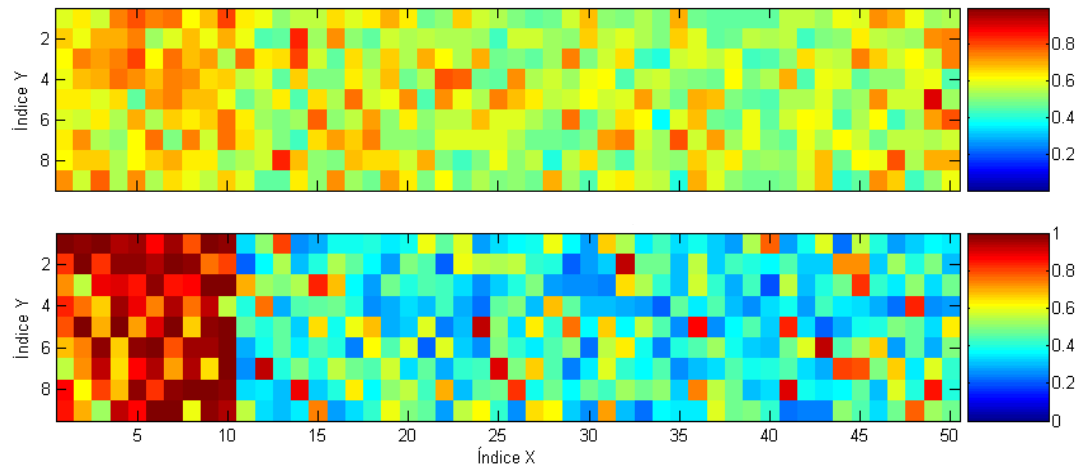


Figura 37. Mapa das probabilidades avaliadas de ocorrer pressões de poros > 15 MPa. Mapa superior: resultados através de  $V_p$ , resultados através de  $V_p$  e  $V_s$ .

A seguir, remete-se novamente aos resultados da previsão nas células [8, 4] e [12, 5]<sup>13</sup>. Através da Figura 38 (caso referente à um estado de pressão alta), observa-se que a consideração de  $V_s$  na previsão, mesmo com um erro relativo percentual de 20%, foi capaz de reduzir significativamente o desvio padrão da pressão de poros (redução de 3.30 para 2.27 MPa). Já para o caso da célula [12, 5], situação de pressão

<sup>13</sup> Observa-se que nestas análises, os ruídos adicionados às velocidades reais foram desconsiderados.

de poros normal (Figura 39), a consideração de  $V_s$  melhorou a previsão, porém em menor escala (o desvio padrão foi reduzido de 3.33 para 2.76 MPa).

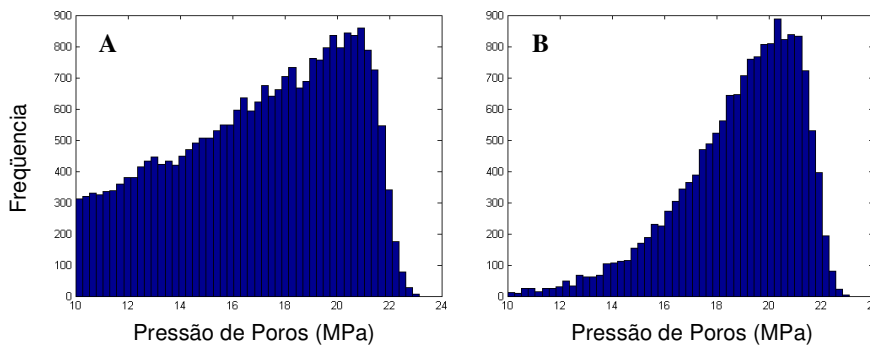


Figura 38. Distribuições *a posteriori* de pressão de poros na célula [8, 4]. A: Previsão através de  $V_p$ . B: Previsão através de  $V_p$  e  $V_s$ .

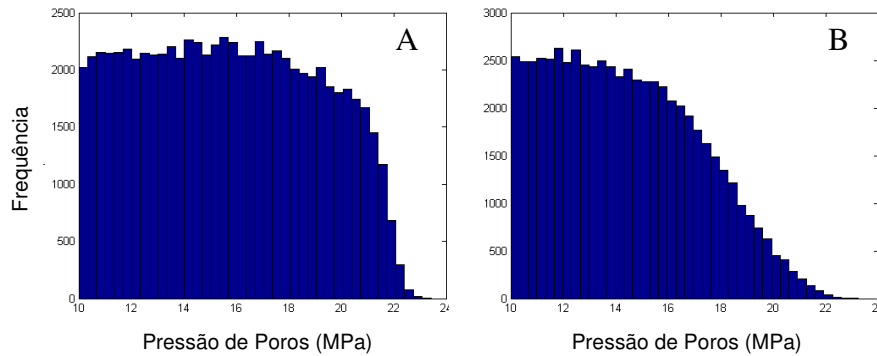


Figura 39. Distribuições *a posteriori* de pressão de poros na célula [12, 5]. A: Previsão através de  $V_p$ . B: Previsão através de  $V_p$  e  $V_s$ .

Para finalizar a análise da contribuição de  $V_s$  neste caso de previsão de pressão de poros, executa-se uma série de previsões para célula [8, 4] considerando diferentes níveis de incertezas associadas à  $V_s$  (10%, 15%, 20%, 30%)<sup>14</sup>. Os resultados são apresentados através de intervalos de confiança e desvios padrões (Figura 40).

<sup>14</sup> Mais uma vez desconsiderou-se os ruídos adicionados às velocidades reais.



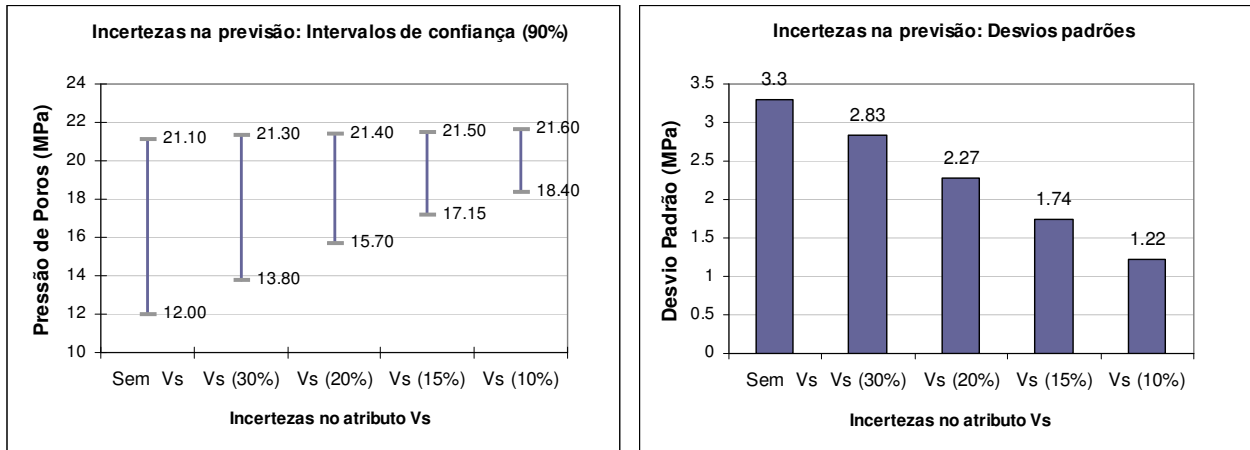


Figura 40. Contribuição de  $V_s$  na previsão de pressão de poros, considerando as incertezas associadas ao atributo.

Através dessas análises, demonstra-se mais uma vez que o atributo  $V_s$  pode contribuir significativamente na previsão de pressão de poros em rochas não consolidadas, e que esta contribuição depende do nível de incertezas associadas a esta informação. Mesmo quando o atributo  $V_s$  apresenta grandes incertezas, este pode ainda sim contribuir na previsão de pressões de poros.

### 8.3.

#### Caso 2: Arenitos consolidados

Neste exemplo, a metodologia é aplicada para o caso de uma rocha-reservatório consolidada. Simplificando o problema, define-se que todas as características deste reservatório são as mesmas descritas para o reservatório anterior (caso 1). E define-se também que todas as informações *a priori* sobre o reservatório em questão são as mesmas definidas para o reservatório do caso 1. Sendo assim, as únicas diferenças entre este caso e o caso 1 são os atributos sísmicos disponíveis, que respondem ao modelo de rocha consolidada (item 4.2), e também os coeficientes de calibração da metodologia, que também são ajustados de acordo com o modelo de rocha consolidada.

### 8.3.1.

#### Velocidades reais da rocha

Para se obter as velocidades reais da rocha, utilizou-se a formulação do problema direto, sendo que o modelo apresentado no item 4.2 foi utilizado para fornecer um comportamento de rocha consolidada ao problema direto (utilizou-se as equações (75) e (76) no lugar das equações (20) e (21)). As figuras 41 e 42 apresentam os mapas de velocidades ao longo do reservatório, sendo que na parte inferior de cada figura, os mapas correspondentes ao estado não-consolidado são apresentados para comparação. (Observa-se que as escalas dos mapas são diferentes, e que uma comparação deve ser feita pelo contraste observado entre as velocidades nos compartimentos A e B). Nitidamente, observa-se que o regime de pressões de poros (pressão alta no compartimento A e baixa no compartimento B) exerce um menor contraste nas velocidades de rocha consolidada, sobretudo no que se refere ao mapa de  $V_s$ . Observa-se também nessas figuras (41 e 42), que maiores valores de porosidade (localizados na extrema direita do reservatório, ver Figura 22) produzem velocidades mais baixas do que aquelas produzidas pelas altas pressões de poros.

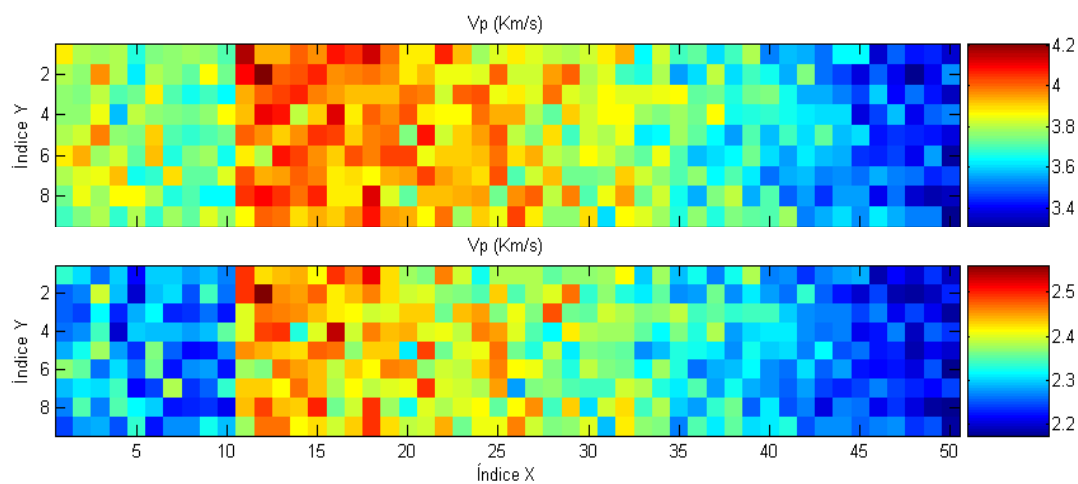


Figura 41. Mapas velocidades compressoriais reais. Mapa superior: estado consolidado.  
Mapa inferior: estado não-consolidado.

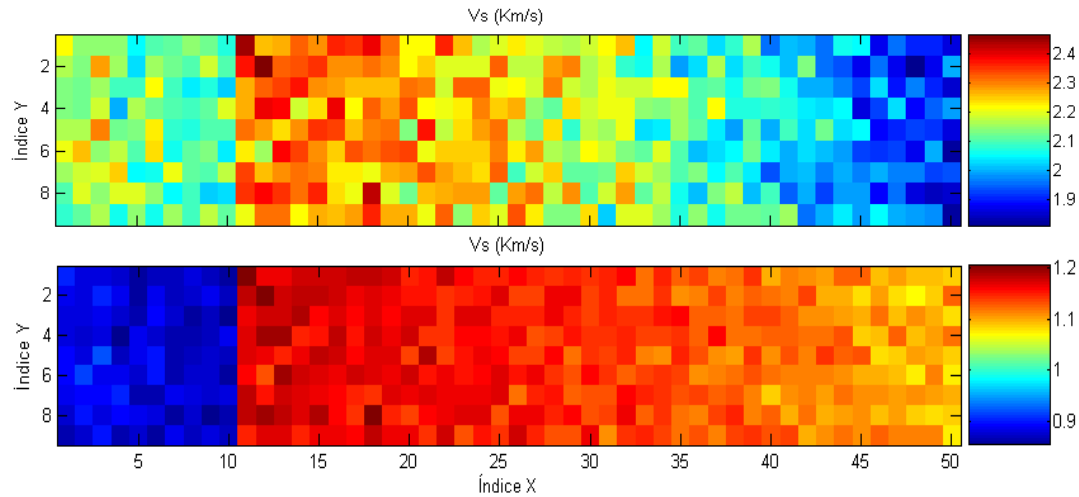


Figura 42. Mapas velocidades cisalhantes reais. Mapa superior: estado consolidado.  
Mapa inferior: estado não-consolidado.

### 8.3.2.

#### Simulação de atributos sísmicos

Como no exemplo anterior, os atributos sísmicos disponíveis para a previsão de pressão de poros são simulados através da inclusão de um ruído pseudo-aleatório nas velocidades reais (Figura 43). Neste exemplo, também foram considerados erros relativos percentuais de 10% para  $V_p$  e 20% para  $V_s$ . Observe como o efeito da alta pressão de poros (no compartimento A) foi camuflado pela inclusão deste ruído.

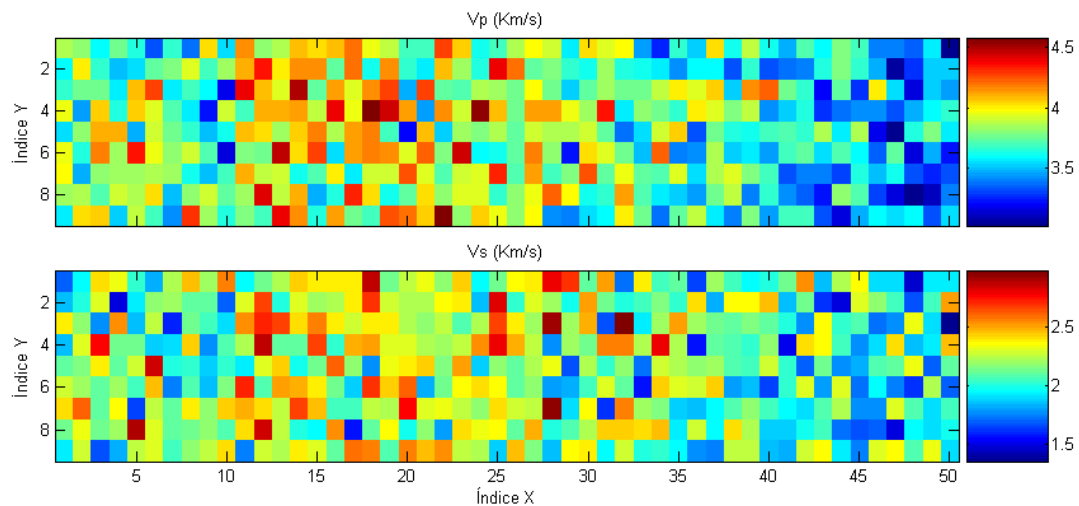


Figura 43. Mapas de  $V_p$  e  $V_s$  obtidos por inversão sísmica (Velocidades reais corrompidas por erros pseudo-randômicos). O efeito da alta pressão de poros no compartimento A foi praticamente camuflado pela inclusão de ruído.

**8.3.3.****Calibração do modelo de física de rochas**

Também como no exemplo anterior, um conjunto de 20 amostras de rocha foi sinteticamente construído. A partir do modelo para rochas consolidadas, descrito no item 4.2, simulou-se ensaios do tipo velocidade vs pressão diferencial para cada amostra (resultados no anexo 2). A partir desses resultados, aplicou-se o processo de calibração proposto por Eberhart-Phillips et al. (1989), obtendo os coeficientes das equações (12) e (13) (Tabela 6).

Tabela 6. Valores ótimos dos coeficientes de calibração do modelo.

$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
5.987	-8.056	-1.966	0.638	18.38
$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
3.733	-4.791	-1.614	0.373	17.3

**8.3.4.****Inversão de pressão de poros**

A Figuras 44 e 45 apresentam os resultados obtidos através da inversão<sup>15</sup>. Através desses resultados, fica muito claro que estamos diante de um caso em que pouco se pode inferir sobre as pressões de poros. Ou seja, com o nível de conhecimento que se possui sobre as propriedades do reservatório (informações *a priori*) e com o nível de incertezas associadas às velocidades obtidas pela inversão sísmica, pouco se pode inferir sobre o regime de pressões de poros no reservatório. (Observe que as médias e desvios padrões das distribuições *a posteriori* são muito semelhantes à média e desvio padrão da distribuição *a priori* ( $\mu = 15.92$  MPa e  $\sigma = 3.43$  MPa)).

---

<sup>15</sup> Observa-se que mais uma vez foram consideradas incertezas de 10% para  $V_p$  e 20% para  $V_s$ .

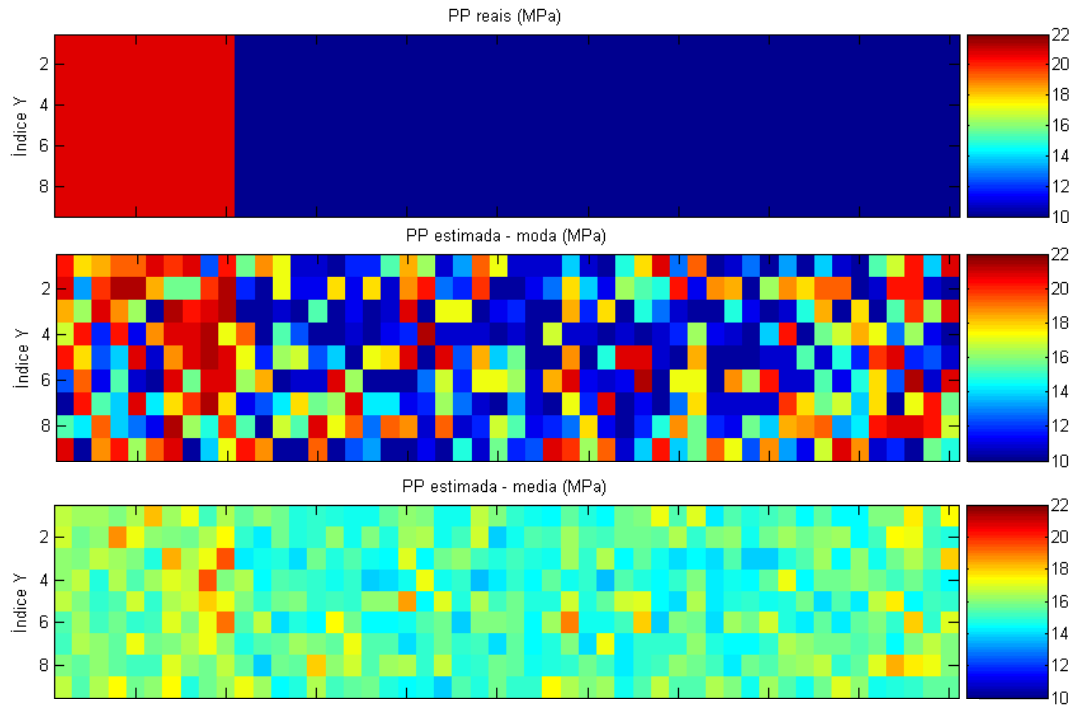


Figura 44. Mapa superior: pressões de poros reais. Nos mapas central e inferior, os resultados obtidos pela inversão: respectivamente as modas e as médias das distribuições *a posteriori* de pressão de poros em cada célula.

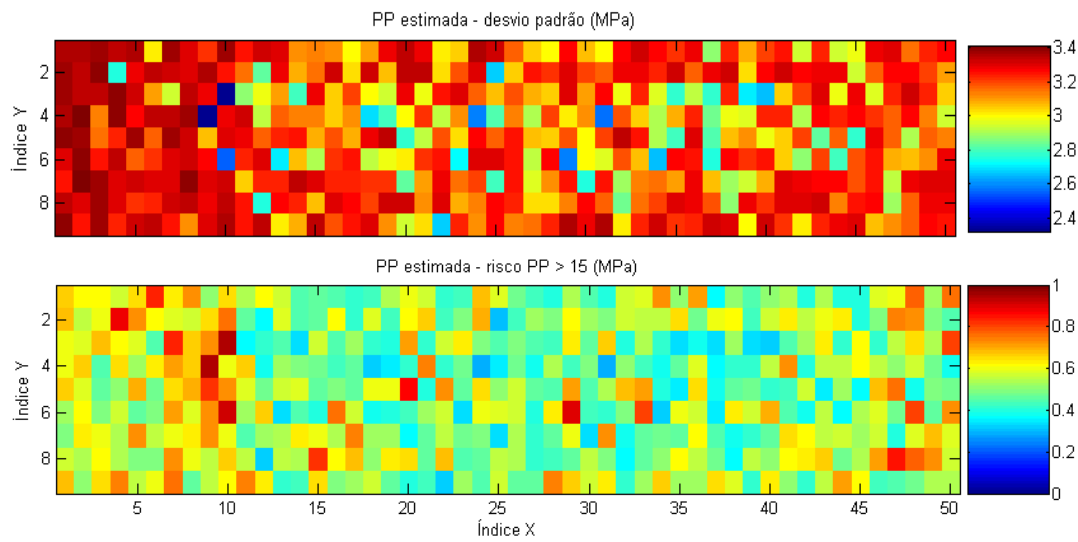


Figura 45. Mapa dos desvios padrões das pressões de poros estimadas e das probabilidades de ocorrer pressões de poros maiores que 15 MPa.

Mas deve-se observar também, que apesar das grandes incertezas associadas às pressões de poros estimadas, ainda assim pôde-se observar, principalmente através do mapa das modas (mapa central da Figura 44) e das probabilidades de ocorrer uma

pressão acima de 15 MPa (mapa inferior da Figura 45), que existe uma possível compartimentalização de pressões no reservatório. Mas observe que as incertezas são muito grandes para qualquer decisão.

Ao se comparar os resultados deste caso (arenito consolidado) com os resultados do caso 1 (arenito não-consolidado) (Figuras 30, 31 e 32), confirma-se o fato de que a previsão de pressões de poros através de  $V_p$  e  $V_s$  em arenitos consolidados é bem mais difícil, e que as incertezas envolvidas nas estimativas são maiores.

### 8.3.5.

#### **Análise da contribuição de $V_s$**

Para analisar a contribuição do atributo  $V_s$  na previsão de pressão de poros em rochas consolidadas, recorre-se novamente à célula [8, 4] do reservatório, onde se executa uma série de previsões considerando diferentes níveis de incertezas associadas à  $V_s$  (5%, 10%, 15% e 20%)<sup>16</sup>. Observe que nestas análises, as incertezas consideradas para  $V_p$  foram de 5%, já que ao se considerar 10% de incertezas para  $V_p$  e 20% de incertezas para  $V_s$ , os resultados da previsão obtiveram pouco sucesso. As figuras 46 e 47 apresentam os resultados.

Através dessas análises, observou-se que a contribuição do atributo  $V_s$  na previsão foi pequena, e que esta só pôde ser observada ao se considerar pequenas incertezas associadas ao atributo. Ao se comparar esses resultados com os obtidos para uma situação de rocha não consolidada (Figura 40), observa-se que a contribuição do atributo  $V_s$  na previsão de pressões de poros é diferente para as situações de rocha consolidada e não consolidada. Para o caso de rocha consolidada, a contribuição de  $V_s$  não é tão significativa quanto ela é para o caso de rochas não consolidadas.

---

<sup>16</sup> Observa-se que mais uma vez os ruídos aleatórios adicionados às velocidades reais foram desconsiderados neste tipo de análise.

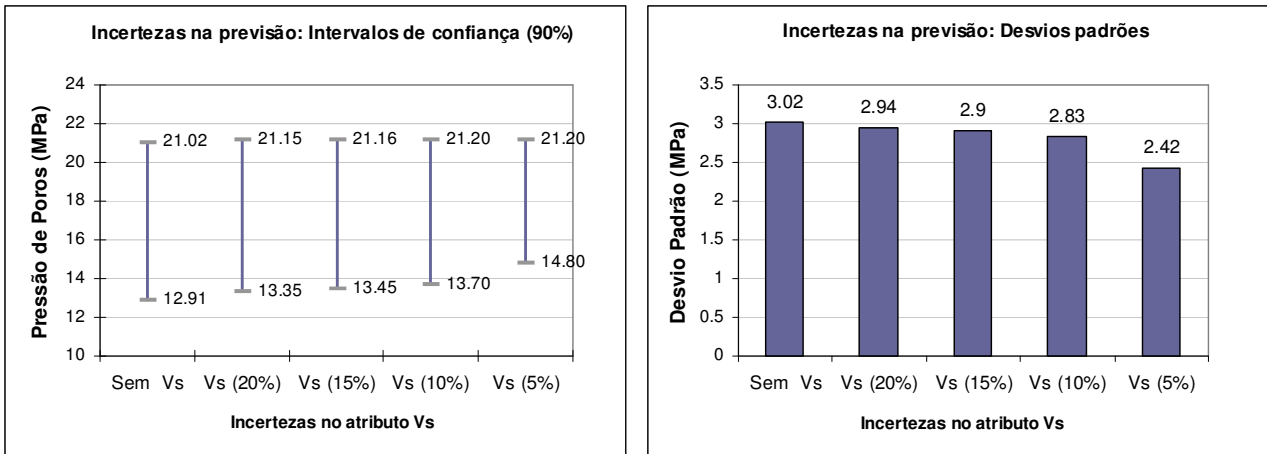


Figura 46. Contribuição do atributo  $V_s$  na previsão de pressão de poros, considerando as incertezas associadas. Uma melhora na previsão só foi observada ao se considerar uma excelente informação sobre  $V_s$ .

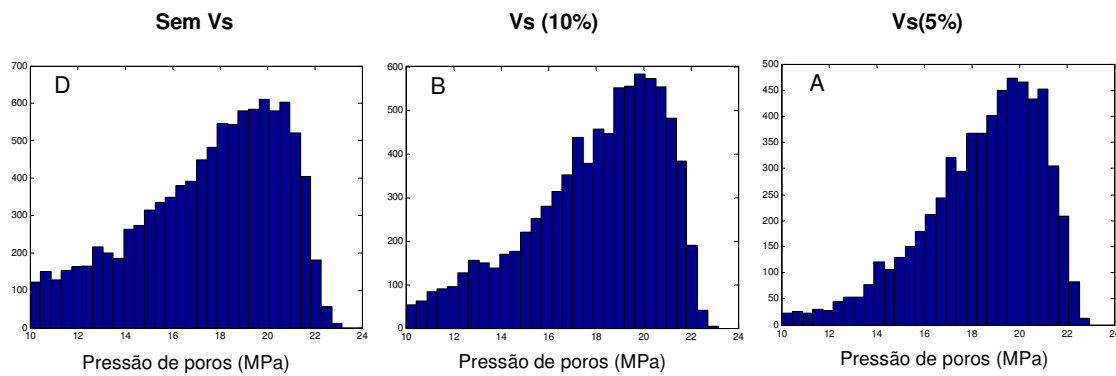


Figura 47. Histogramas obtidos ao se realizar a inversão para a célula [8,4] do reservatório. Ao se comparar a figura A e B, observa-se que a informação sobre  $V_s$  com 10% de incertezas não melhorou efetivamente a previsão de pressão de poros. Ao se comparar A e C, observa-se que a informação sobre  $V_s$  com 5% de incertezas possibilita uma ligeira redução das incertezas associadas à pressão de poros estimada.

A diferente contribuição do atributo  $V_s$  na previsão de pressão de poros para os casos de rocha consolidada e não consolidada pode ser explicada pelas seguintes razões. Em primeiro lugar, as velocidades cisalhantes de rochas não consolidadas são mais sensíveis à variação de pressões diferenciais, sobretudo em uma situação de baixas pressões diferenciais. Em segundo lugar, as velocidades compressionais da rocha não consolidada são muito sensíveis ao fluido de saturação, o que faz com que incertezas sobre o fluido de saturação no campo aumentem as incertezas associadas a

uma previsão através deste atributo somente. Ao se considerar também  $V_s$  na previsão, que é muito pouco sensível ao fluido, outras restrições são impostas à inversão, o que reduz as incertezas associadas às pressões obtidas. Já a rocha consolidada, esta é menos sensível ao fluido de saturação, o que faz com que a informação de  $V_s$  não contribua tanto considerando este aspecto.