

5 Estudo de Casos

5.1 Estudo de Caso I

Este estudo de caso foi desenvolvido a fim de validar e avaliar o modelo de solução proposto nesse trabalho. Para isso, criou-se uma variação do modelo de simulação de reservatório utilizado por [3].

5.1.1 Modelo de Simulação

5.1.1.1 Caso Alvo

A fim de validar o modelo de solução proposto nesse trabalho, criou-se um modelo de simulação de reservatório, apelidado de Xadrez-Listrado, baseado no modelo apresentado por [3]. Este modelo é constituído por uma malha tridimensional com 21 x 21 x 5 blocos, totalizando 2205 blocos. Todos os blocos têm as mesmas dimensões e não há blocos nulos nem falhas no modelo. Todas as propriedades do reservatório são homogêneas, exceto a permeabilidade e a porosidade.

Os mapas de permeabilidade (xadrez) e porosidade (listrado) são as variáveis de interesse. O mapa de permeabilidade varia ao longo do reservatório, mas em um mesmo bloco as permeabilidades nas direções i e j são iguais ($k_x = k_y$) e na direção k (k_z) é igual a 30% da permeabilidade em i e j . O mapa de porosidade também varia ao longo do reservatório, mas mantendo constante em um mesmo bloco.

A malha de drenagem é composta por 13 poços verticais, sendo 9 produtores e 4 injetores. Todos os poços são completados em todas as camadas do reservatório. As distribuições da permeabilidade, da porosidade e da localização dos poços no reservatório estão ilustradas na Figura 5.1. Os poços estão identificados de acordo com a sua posição no modelo, assim o poço *PROD_1-21* está localizado no bloco $i = 1$ e $j = 21$, ou seja, no canto inferior esquerdo.

O histórico de produção é de 10 anos e a previsão deve ser efetuada para os 5 anos seguintes. Os poços produtores são controlados pela vazão de óleo

durante os 10 anos de histórico, enquanto durante o período de 5 anos de previsão estes poços são controlados pela vazão de líquido (óleo + água).

Para a realização dos experimentos, o modelo Xadrez-Listrado foi considerado o caso alvo, ou seja, o modelo que representa a realidade que deve ser alcançada pelo processo de otimização.

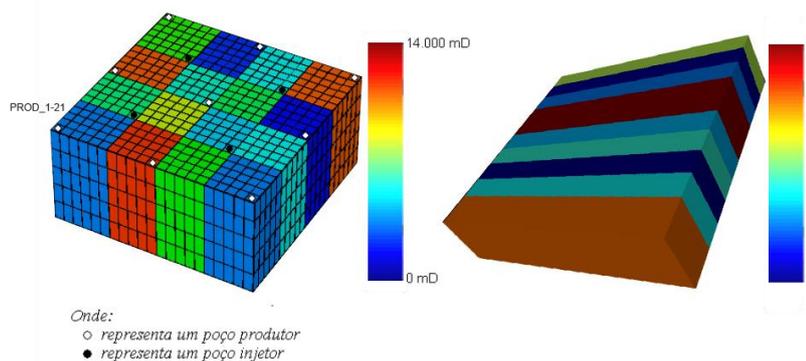


Figura 5.1: Mapa de permeabilidade e porosidade com localização dos poços

5.1.1.2 Caso Base

O caso de partida do processo de otimização, ou seja, o caso base foi gerado a partir do alvo variando-se de até 80% para mais ou para menos os valores de permeabilidade e de porosidade em todos os blocos do modelo. Este modelo também apresenta alguns canais de alta permeabilidade e barreiras de baixa permeabilidade para, respectivamente, facilitar e dificultar a chegada da frente de água nos poços produtores [3].

Desse modo, foi possível obter um caso base onde os mapas de permeabilidade e porosidade assim como as taxas de produção de água dos poços produtores estivessem bem distantes do desejado.

As Figuras 5.2 e 5.3 exibem, respectivamente, a distribuição dos valores de permeabilidade e porosidade em todas as camadas do caso base. Na camada 1, exibida na Figura 5.2, estão destacados os canais que favorecem o escoamento de fluidos entre alguns pares de poços produtores e injetores e também as barreiras que dificultam esse escoamento. Vale lembrar que estes canais e barreiras se estendem por todas as camadas do mapa de permeabilidade.

Para avaliar os mapas de permeabilidade e porosidade foi adotado o mesmo critério de [3], sendo definida uma função de avaliação que é aplicada ao final do processo evolutivo sobre a melhor solução encontrada pelo algoritmo genético coevolutivo. Esta função mede a diferença entre o mapa alvo e o mapa otimizado. Deste modo, é possível avaliar a capacidade de ajuste das curvas de produção (Equação 4.1) assim como o ajuste dos valores das propriedades de interesse. A Equação 5.1 apresenta esta função de avaliação de mapa de propriedade.

$$RMSE_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_a(i) - p_e(i))^2}{n}} \quad (5.1)$$

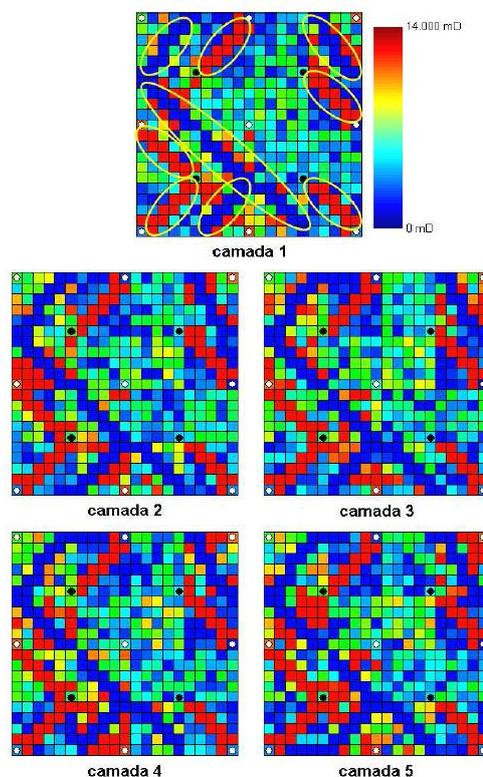
Onde:

$RMSE_m$ é o erro entre os mapas da propriedade de interesse;

p_a é o valor alvo da propriedade de interesse;

p_e é o valor estimado da propriedade de interesse;

n é o número de blocos do modelo de simulação do reservatório.



Onde:

- representa um poço produtor
- representa um poço injetor

Figura 5.2: Mapa de permeabilidade do caso base (fonte: Silva, 2011)

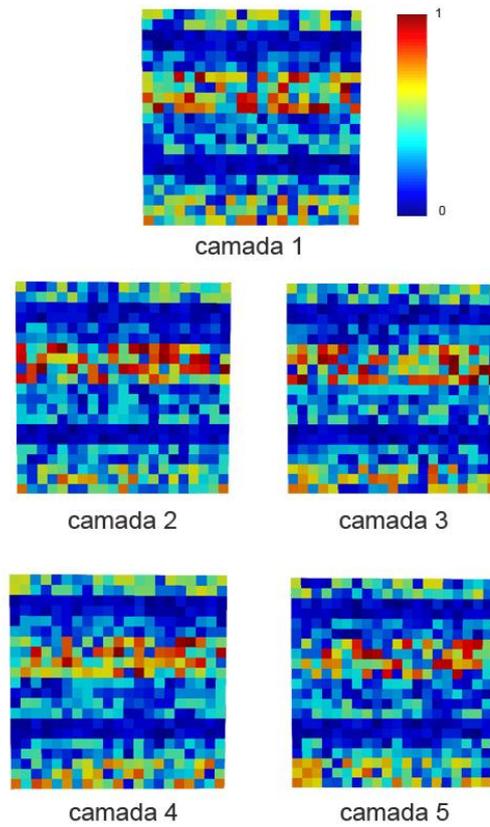


Figura 5.3: Mapa de porosidade do caso base

Após a sua geração, o caso base foi submetido à função de avaliação definida na Equação 4.1 para o cálculo do $RMSE_p$ de histórico e previsão da produção de água. Em seguida, para calcular os erros dos mapas de porosidade e de permeabilidade em relação ao caso alvo, representados, respectivamente, por $RMSE_{m_por}$ e $RMSE_{m_per}$, submeteu-se o caso base a função de avaliação definida na Equação 5.1. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5.1 e as curvas de produção de água para o caso base e alvo são exibidas nas Figuras 5.4 e 5.5.

	$RMSE_p$ (m ³)		$RMSE_{m_por}$	$RMSE_{m_per}$ (mD)
	Histórico	Previsão		
Caso Base	1965,89	1249,54	0,28	4945,49

Tabela 5.1: $RMSE_p$, $RMSE_{m_por}$ e $RMSE_{m_per}$ do caso base

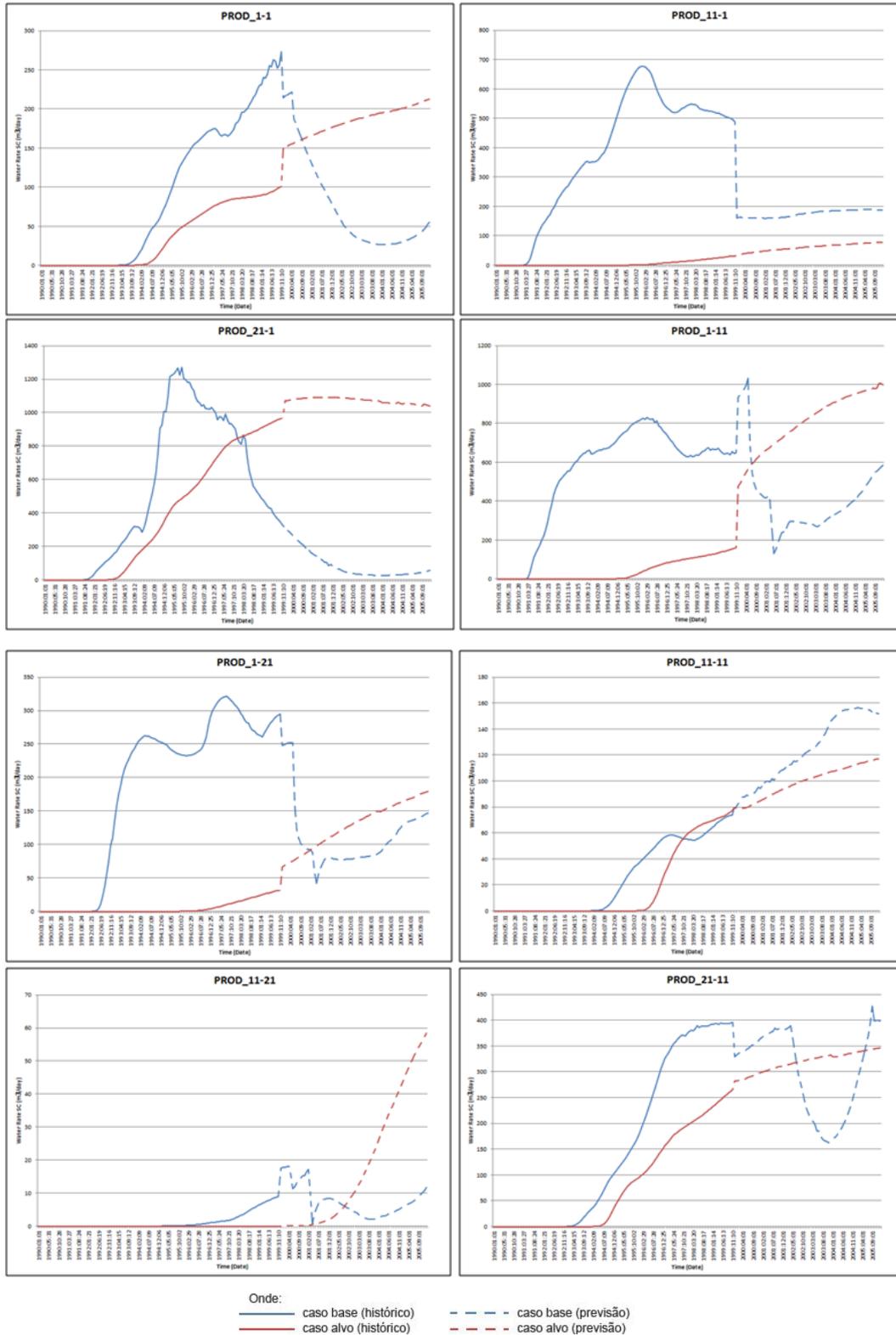


Figura 5.4: Curvas de produção de água. Caso base e alvo

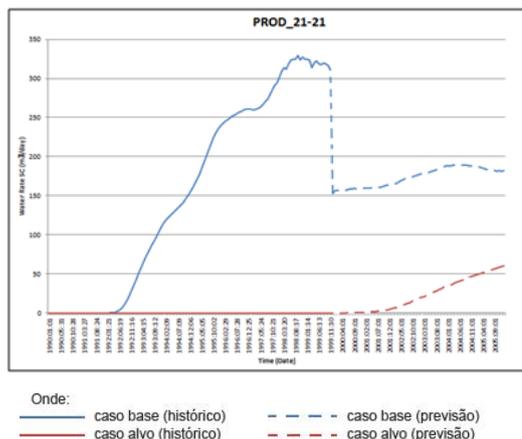


Figura 5.5: Curvas de produção de água. Caso base e alvo

5.1.1.3 Imagem de Treinamento

O algoritmo *FILTERSIM* necessita de uma imagem de treinamento que descreva o padrão de comportamento dos valores da propriedade de interesse. Esta imagem deve ser construída por um especialista com base em seus conhecimentos sobre os padrões esperados de uma dada propriedade. Para o modelo Xadrez-Listrado foram utilizadas duas imagens de treinamento, sendo a primeira utilizada para evoluir os indivíduos de mapas de permeabilidade e a segunda para evoluir os indivíduos de mapas de porosidade (Figura 5.6).

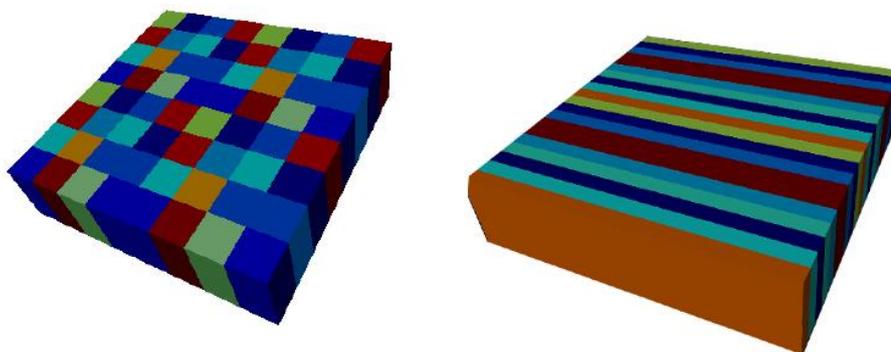


Figura 5.6: Imagem de treinamento para permeabilidade e porosidade, respectivamente

5.1.2 Modelo de Solução I

Para a avaliação do Modelo de Solução I, proposto nesse trabalho, foi realizada uma análise, sobre o experimento descrito abaixo, onde o modelo de simulação de reservatório Xadrez-Listrado, definido na Seção 5.1.1, foi considerado como caso alvo.

O experimento consiste no ajuste de histórico das curvas de produção de água de um modelo de simulação de reservatório. Para realizar o ajuste das curvas, será utilizado o Modelo de Solução I. Este modelo de solução busca o ajuste das curvas de produção de água através da otimização simultânea dos mapas de permeabilidade e de porosidade, mantendo todas as outras propriedades do reservatório inalteradas.

5.1.2.1 Preparação do Processo de Otimização

Como caso de partida, representando uma solução que deve ser fornecida por um especialista, será utilizado o caso base definido na Seção 5.1.1.2. Este caso base representa o estado atual das propriedades do modelo de simulação.

O modelo de solução proposto faz uso do algoritmo *FILTERSIM* para aplicação da estatística de múltiplos pontos. Esse algoritmo necessita que seja informada uma imagem, denominada imagem de treinamento, que represente o comportamento da propriedade que se deseja otimizar. As imagens de treinamento utilizadas neste experimento foram apresentadas na Seção 5.1.1.3.

Antes de inicializar o processo de evolução em busca de um modelo de simulação que se aproxime do real comportamento do reservatório, é preciso configurar o algoritmo genético coevolutivo. Os parâmetros de configuração e seus respectivos valores são apresentados na Tabela 5.2.

Parâmetro de Evolução	Valor
Tamanho da população	70
Número de gerações	30
Taxa de <i>steady state</i> (entre gerações)	0,20
Número de rodadas	10
Taxa de <i>steady state</i> (entre rodadas)	0,10
Taxa de cruzamento	0,85 - 0,50
Taxa de mutação I	0,08 - 0,25
Taxa de mutação II	0,10
Taxa de anulação	0,70

Tabela 5.2: Parâmetros de Evolução – Estudo I

Ainda no processo de preparação do experimento, foram calculados os erros apresentados pelo caso base na tentativa de reproduzir o comportamento do reservatório. Estes valores são exibidos na Tabela 5.1 e representam, respectivamente, os erros no ajuste das curvas de produção de água no período

considerado como histórico e como previsão e os erros entre os mapas de porosidade e permeabilidade do caso base em relação ao caso alvo.

5.1.2.2 Avaliação

Após a conclusão do processo de otimização, recuperou-se a melhor solução encontrada pelo algoritmo genético coevolutivo. Essa solução foi denominada de caso otimizado e representa o novo modelo de simulação do reservatório. Em seguida, através do módulo de apresentação, foram geradas as curvas de produção de água. Estas curvas são exibidas nas Figuras 5.7 e 5.8, onde cada gráfico está identificado com o nome do respectivo poço.

Utilizando-se ainda o módulo de apresentação, foram calculados os erros no ajuste das curvas de produção de água no período considerado como histórico e como previsão. Também foram calculados os erros entre os mapas de porosidade e permeabilidade do caso otimizado em relação ao caso alvo. A Tabela 5.3 disponibiliza os valores obtidos e normalizados em relação ao caso base.

	RMSE _p		RMSE _{m_por}	RMSE _{m_per}
	Histórico	Previsão		
Caso Otimizado	0,11	0,07	0,34	0,24

Tabela 5.3: RMSE_p, RMSE_{m_por} e RMSE_{m_per} do caso otimizado – Estudo I – Modelo I

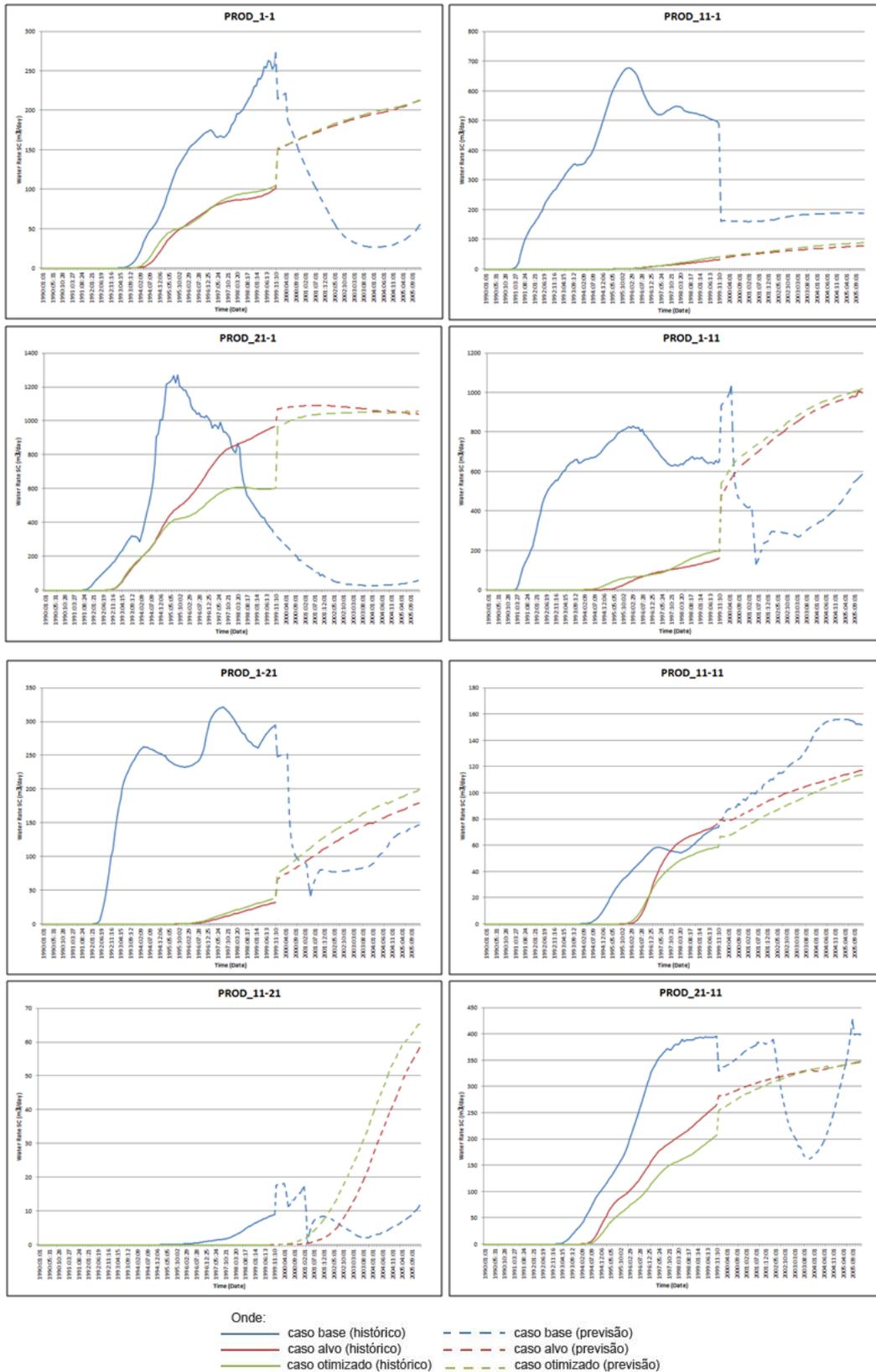


Figura 5.7: Curvas de produção de água. Caso otimizado – Estudo I – Modelo I

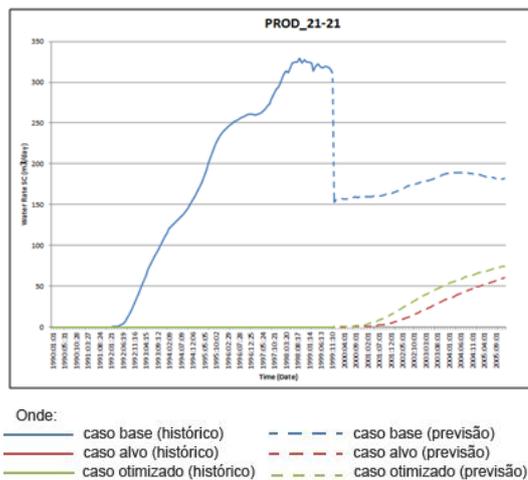


Figura 5.8: Curvas de produção de água. Caso otimizado – Estudo I – Modelo I

Para a geração das imagens dos mapas de permeabilidade e de porosidade, é necessário converter o arquivo de mapa de cada propriedade do modelo de simulação do reservatório, que se encontra no formato *INCLUDE*, padrão especificado em [7], para o formato *GSLIB*, padrão especificado em [47].

As imagens dos mapas de permeabilidade e de porosidade, exibidas nas Figuras 5.9 e 5.10, foram geradas utilizando-se umas das ferramentas desenvolvidas nesse trabalho. Esta ferramenta converte um arquivo no formato *INCLUDE* para *GSLIB*. Após a conversão dos arquivos dos mapas de permeabilidade e de porosidade, eles foram carregados no software SGeMS para visualização.

A curva de evolução do algoritmo genético coevolutivo exibindo a melhor solução encontrada em cada geração, durante o processo de otimização realizado pelo Modelo de Solução I, também é obtida a partir do módulo de apresentação. Esta curva de evolução do processo de otimização é apresentada na Figura 5.11.

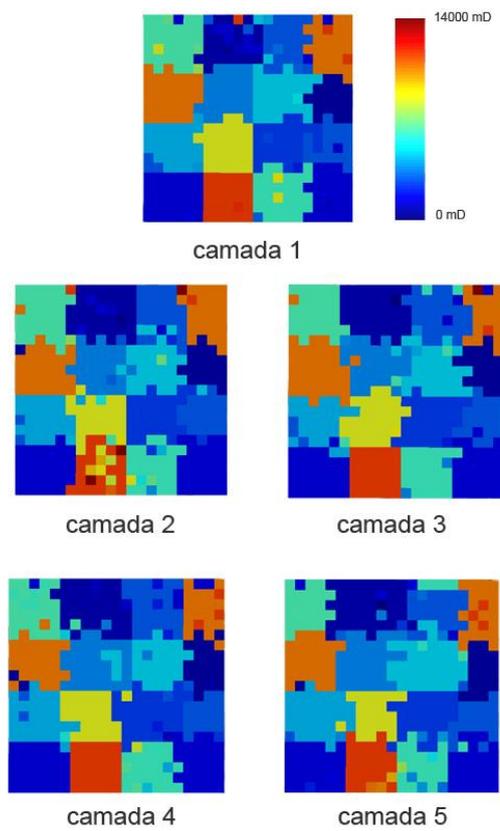


Figura 5.9: Mapa de permeabilidade do caso otimizado – Estudo I – Modelo I

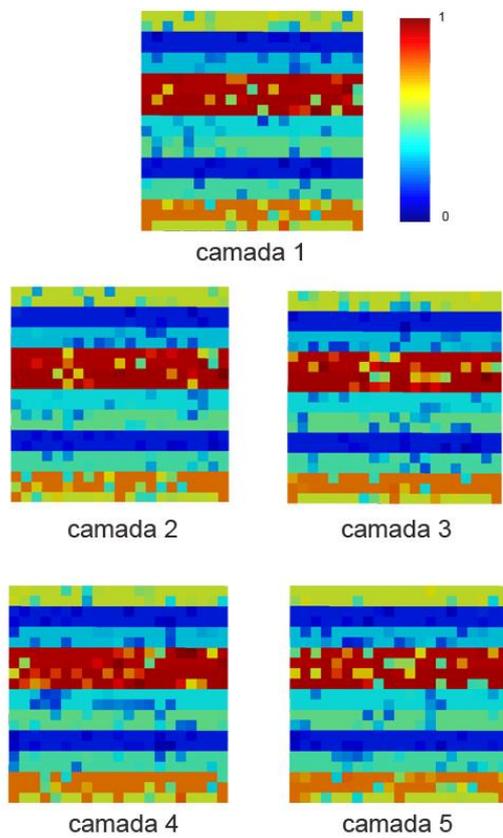


Figura 5.10: Mapa de porosidade do caso otimizado – Estudo I – Modelo I

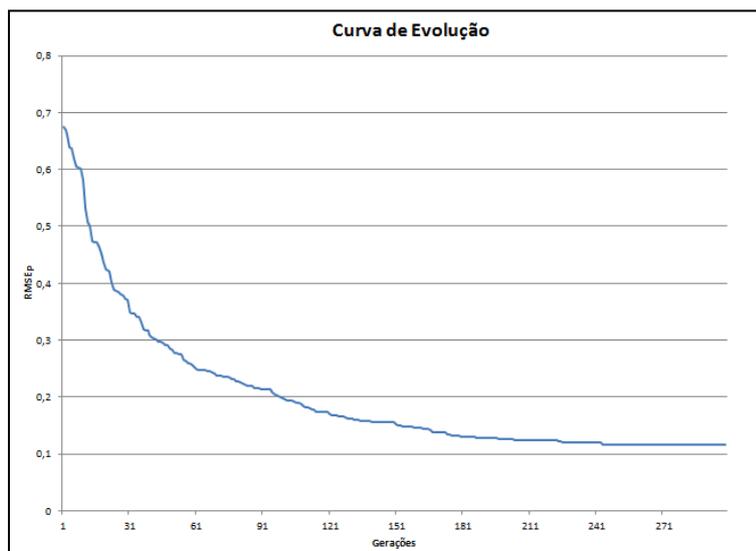


Figura 5.11: Curva de evolução da otimização – Estudo I – Modelo I

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo de solução desenvolvido realizou um ajuste razoável tanto das curvas de produção de água quanto dos mapas de permeabilidade e de porosidade. A redução do erro associado ao ajuste das curvas de produção para o período definido como histórico e para o período de previsão foram, respectivamente, de 88,37% e 92,69% em relação ao caso base de partida.

O modelo de solução também apresentou reduções consideráveis no erro de ajuste dos mapas de permeabilidade e de porosidade. Estas reduções foram de 65,88% para o mapa de permeabilidade e de 75,63% para o mapa de porosidade.

É importante destacar a flexibilidade do modelo de solução em poder otimizar, ao mesmo tempo, duas ou mais propriedades do modelo de reservatório, sem que se conheça uma lei ou função que estabeleça uma relação entre elas.

Vale ressaltar ainda que, durante o processo evolutivo da otimização simultânea dos mapas de porosidade e de permeabilidade, as simulações foram distribuídas utilizando o módulo distribuidor, aumentando assim o poder computacional da solução proposta.

5.1.3 Modelo de Solução II

Para a avaliação do Modelo de Solução II, proposto nesse trabalho, utilizou-se o mesmo procedimento realizado na análise do Modelo de Solução I.

Durante a realização dos experimentos, o modelo de simulação de reservatório Xadrez-Listrado, definido na Seção 5.1.1, foi considerado como caso alvo.

5.1.3.1 Preparação do Processo de Otimização

Para avaliar o resultado das alterações propostas no Modelo de Solução II, realizou-se a otimização dos mapas de permeabilidade e de porosidade concomitantemente. O algoritmo genético coevolutivo foi configurado com os mesmos parâmetros utilizados durante a avaliação do Modelo de Solução I. As configurações do algoritmo genético coevolutivo são apresentadas na Tabela 5.2.

O caso base para a otimização também foi o mesmo utilizado na Seção 5.1.3, durante a avaliação do Modelo de Solução I. Seus valores de *RMSE* da produção e dos mapas de porosidade e permeabilidade são mostrados na Tabela 5.1.

As imagens de treinamento utilizadas pelo *FILTERSIM* para reconstruir os mapas de permeabilidade e de porosidade são exibidas na Figura 5.6. Assim como o caso base, estas imagens também foram as mesmas utilizadas na avaliação do Modelo de Solução I.

5.1.3.2 Avaliação

Após a conclusão do processo de evolução, o caso otimizado apresentou um ajuste satisfatório das curvas de produção de água. Estas curvas são apresentadas nas Figuras 5.12 e 5.13, onde cada gráfico está identificado com o nome do respectivo poço.

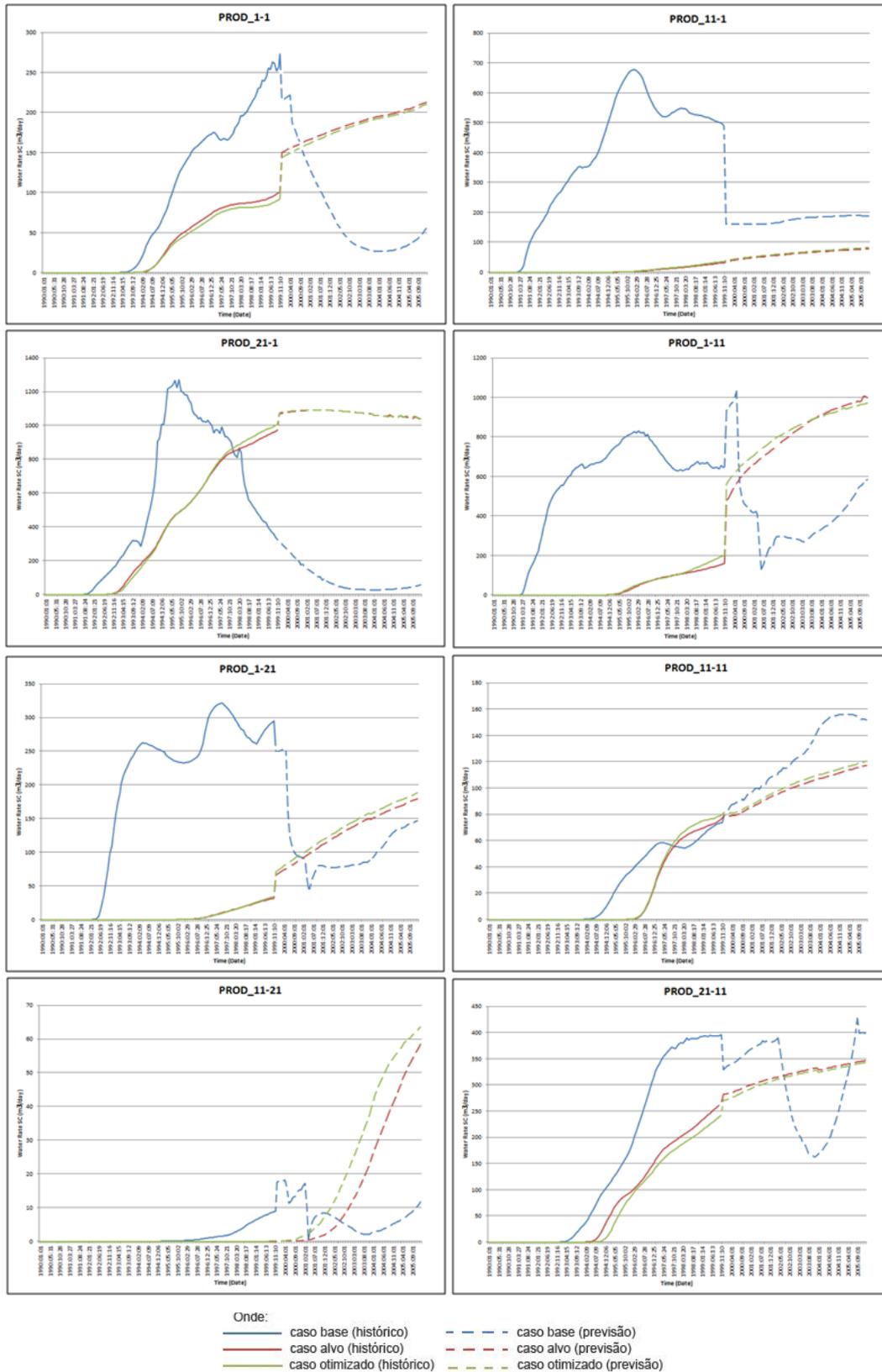


Figura 5.12: Curvas de produção de água. Caso otimizado – Estudo I – Modelo II

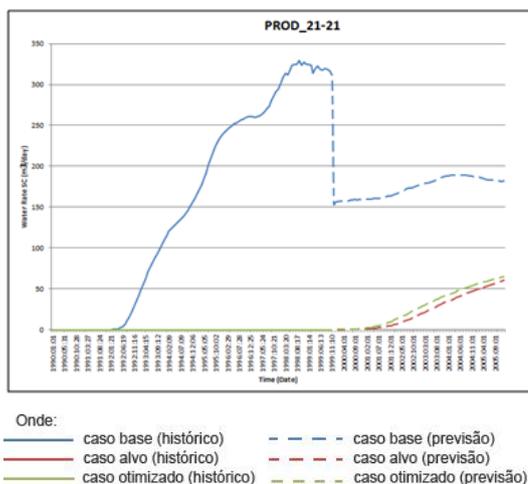


Figura 5.13: Curvas de produção de água. Caso otimizado – Estudo I – Modelo II

Adotando-se o mesmo princípio usado na Seção 5.1.3, tomaram-se os valores de $RMSE$ de produção e de mapa do caso base como referência para avaliar o desempenho do Modelo de Solução II. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 5.4.

	$RMSE_p$		$RMSE_{m_por}$	$RMSE_{m_per}$
	Histórico	Previsão		
Caso Otimizado	0,02	0,03	0,21	0,16

Tabela 5.4: $RMSE_p$, $RMSE_{m_por}$ e $RMSE_{m_per}$ do caso otimizado – Estudo I – Modelo II

Os mapas de permeabilidade e de porosidades resultantes do processo de otimização são exibidos, respectivamente, nas Figuras 5.14 e 5.15.

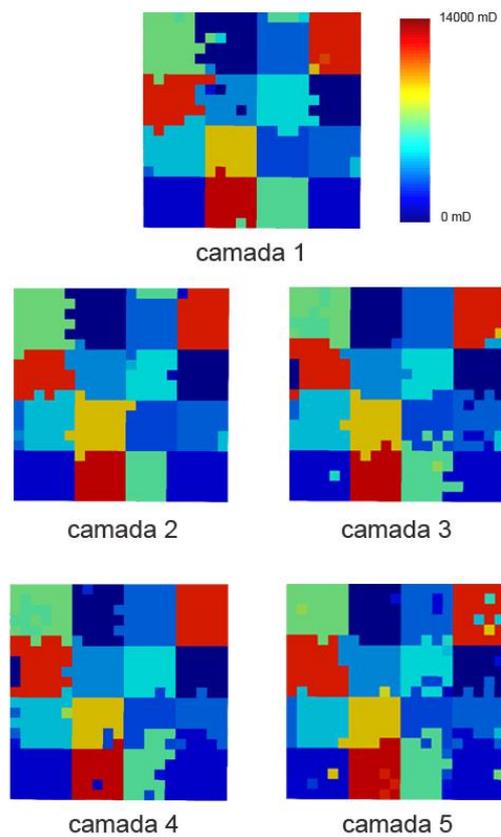


Figura 5.14: Mapa de permeabilidade do caso otimizado – Estudo I – Modelo II

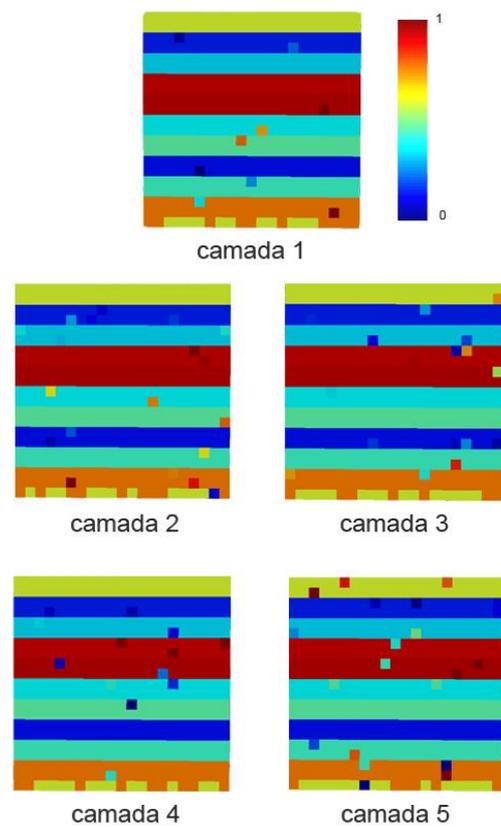


Figura 5.15: Mapa de porosidade do caso otimizado – Estudo I – Modelo II

A curva de evolução do algoritmo genético coevolutivo exibindo a melhor solução em cada geração é apresentada na Figura 5.16.

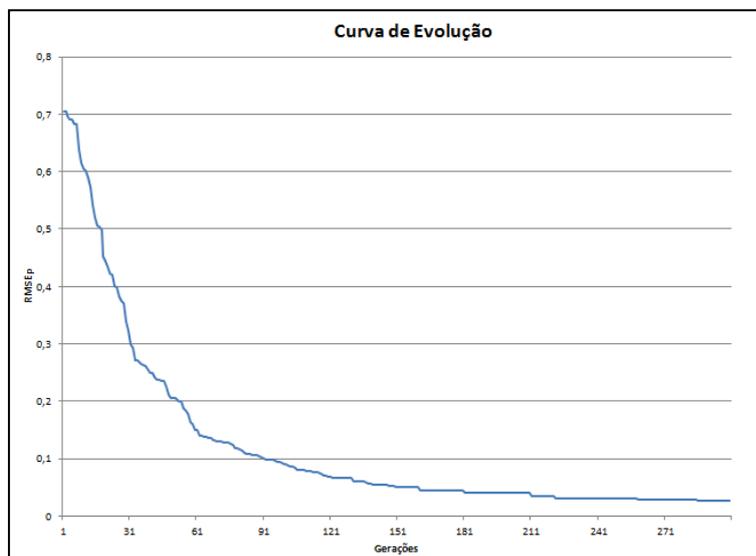


Figura 5.16: Curva de evolução da otimização – Estudo I – Modelo de Solução II

De acordo com os resultados obtidos, o processo de otimização através do Modelo de Solução II encontrou soluções melhores do que o Modelo de Solução I, apresentando os $RMSE_p$ de histórico e de previsão, respectivamente, 9% e 3,48% menores, quando comparados. Os mapas de porosidade e de permeabilidade também foram melhores ajustados apresentando $RMSE$, respectivamente, 12,78% e 7,81% menores em relação a melhor solução encontrada pelo Modelo de Solução I.

Ao analisar a curva de evolução percebem-se alguns degraus entre as rodadas, este comportamento sugere que as alterações em relação à inicialização das populações iniciais entre rodadas surtiu o efeito esperado. A redução dos erros de ajuste das curvas de produção de água, e dos mapas de propriedades, indica que o novo operador de inicialização das populações entre rodadas posiciona o algoritmo genético coevolutivo na direção de melhores soluções.

Vale lembrar que os valores apresentados de $RMSE_p$ de previsão e de histórico, além dos valores de $RMSE_{m_por}$ e $RMSE_{m_per}$, foram normalizados em relação ao caso base.

De acordo com o dissertado acima, é possível concluir que o Modelo de Solução II mostrou desempenho superior em relação ao seu antecessor, Modelo

de Solução I, apresentando um melhor ajuste tanto das curvas de produção quanto dos mapas de porosidade e de permeabilidade, simultaneamente.

5.2

Estudo de Caso II

Este estudo de caso foi desenvolvido a fim de avaliar o Modelo de Solução II, proposto nesse trabalho, quando aplicado a um modelo de simulação de reservatório que apresente características de um modelo real. Para isso, criou-se uma variação do modelo de simulação de reservatório utilizado por [3].

5.2.1

Modelo de Simulação

5.2.1.1

Caso Alvo

A fim de validar o modelo de solução proposto nesse trabalho, criou-se um modelo de simulação de reservatório, apelidado de PUNQ_S3_MOD. O modelo PUNQ_S3 original é baseado em um estudo realizado em um campo real e foi desenvolvido no contexto de um projeto denominado PUNQ (*Production forecasting with UNcertainty Quantification*). Segundo [48][49], uma das finalidades do modelo é permitir a comparação entre diferentes estratégias para o ajuste de histórico.

O modelo PUNQ_S3_MOD é constituído por uma malha tridimensional de 19 x 28 x 5 blocos, totalizando 2660 blocos, dos quais 1761 estão ativos. Sua malha de drenagem é composta por 10 poços verticais, sendo todos produtores. Um intenso aquífero, abrangendo as regiões norte e oeste, se encarrega de manter a pressão do reservatório, por isso não foi necessário utilizar poços injetores. A Figura 5.17 exibe a distribuição dos poços pelo reservatório. Uma descrição mais detalhada do modelo PUNQ_S3, juntamente com um conjunto de dados que permitem a sua construção, estão disponíveis em [50].

O histórico de produção compreende um período de 13 anos, enquanto a previsão deve ser efetuada para os 11 anos seguintes. Durante os 13 anos iniciais, período de histórico, os poços produtores são controlados pela vazão de óleo, passando a serem controlados pela vazão de líquido (óleo + água) durante os 11 anos de previsão. É importante destacar que o modelo original foi alterado para que todos os poços produtores entrassem em atividade no início do período de produção [3].

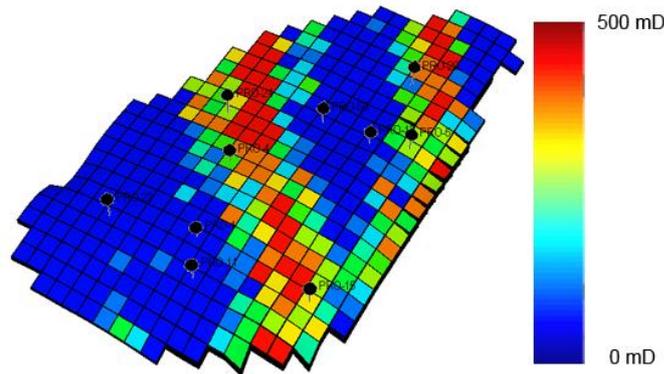


Figura 5.17: Localização dos poços no modelo PUNQ_S3_MOD

As variáveis de interesse, nesse estudo, são os mapas de porosidade e de permeabilidade vertical (k_v). Os mapas de permeabilidade e de porosidade variam ao longo do reservatório, mas mantendo-se constante em um mesmo bloco. As Figuras 5.18 e 5.19 exibem, respectivamente, a distribuição dos valores de permeabilidade e porosidade em todas as camadas do caso alvo.

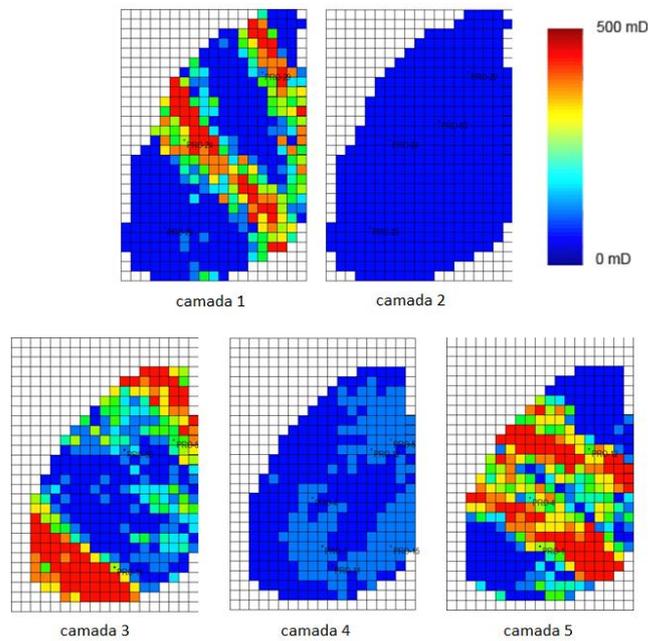


Figura 5.18: Mapa de permeabilidade do caso alvo (fonte: Silva, 2011)

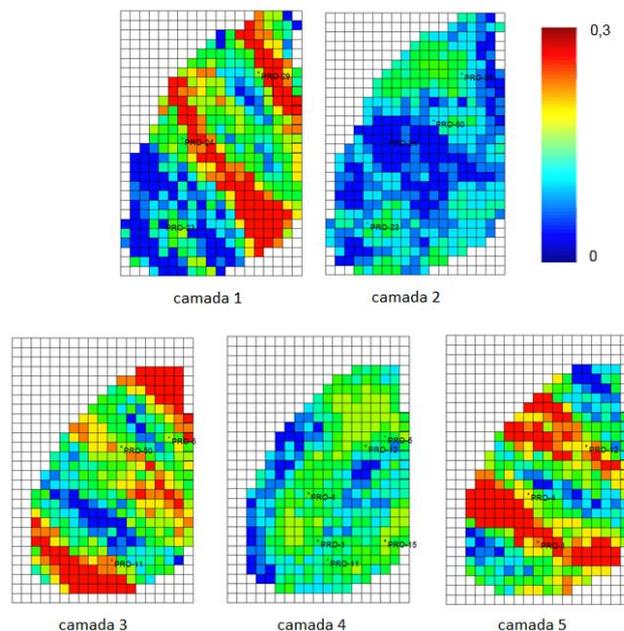


Figura 5.19: Mapa de porosidade do caso alvo

5.2.1.2 Caso Base

O caso de partida do processo de otimização, ou seja, o caso base foi gerado a partir do alvo por um processo de alteração dos valores de porosidade e de permeabilidade vertical, no qual esses valores foram alterados em 80% para mais ou para menos em todos os blocos do modelo. Este modelo de simulação também apresenta alguns canais de alta permeabilidade e barreiras de baixa permeabilidade para alterar a chegada da frente de água nos poços [3].

As Figuras 5.20 e 5.21 exibem, respectivamente, a distribuição dos valores de permeabilidade e porosidade em todas as camadas do caso base.

Para avaliar os mapas de permeabilidade e porosidade, adotou-se o mesmo critério utilizado na Seção 5.1. A avaliação do ajuste das curvas de produção também foi realizada utilizando o mesmo critério da Seção 5.1.

Após a sua geração, o caso base foi submetido ao processo de avaliação definido na Seção 5.1.1.2. Os valores obtidos para o $RMSE_p$, de histórico e previsão da produção de água, assim como, os erros $RMSE_{m_por}$ e $RMSE_{m_per}$ dos mapas de porosidade e de permeabilidade, respectivamente, são apresentados na Tabela 5.5. É importante destacar que estes valores foram calculados em relação ao caso alvo apresentado na Seção 5.2.1.1.

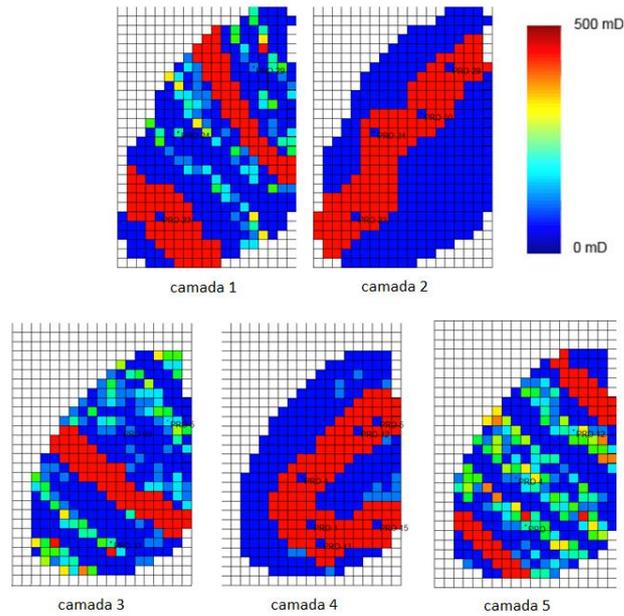


Figura 5.20: Mapa de permeabilidade do caso base (fonte: Silva, 2011)

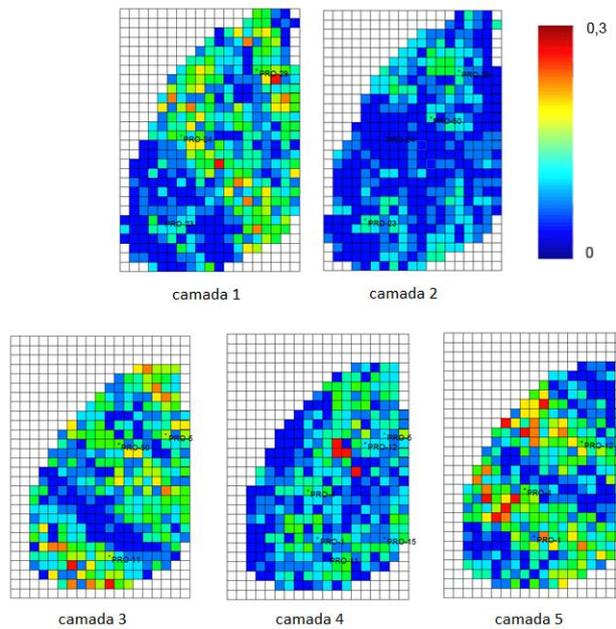


Figura 5.21: Mapa de porosidade do caso base

	RMSE _p (m ³)		RMSE _{m_por}	RMSE _{m_per} (mD)
	Histórico	Previsão		
Caso Base	333,05	286,20	0,20	386,78

Tabela 5.5: RMSE_p, RMSE_{m_por} e RMSE_{m_per} do caso base

As curvas de produção de água para o caso base e alvo são exibidas nas Figuras 5.22 e 5.23.

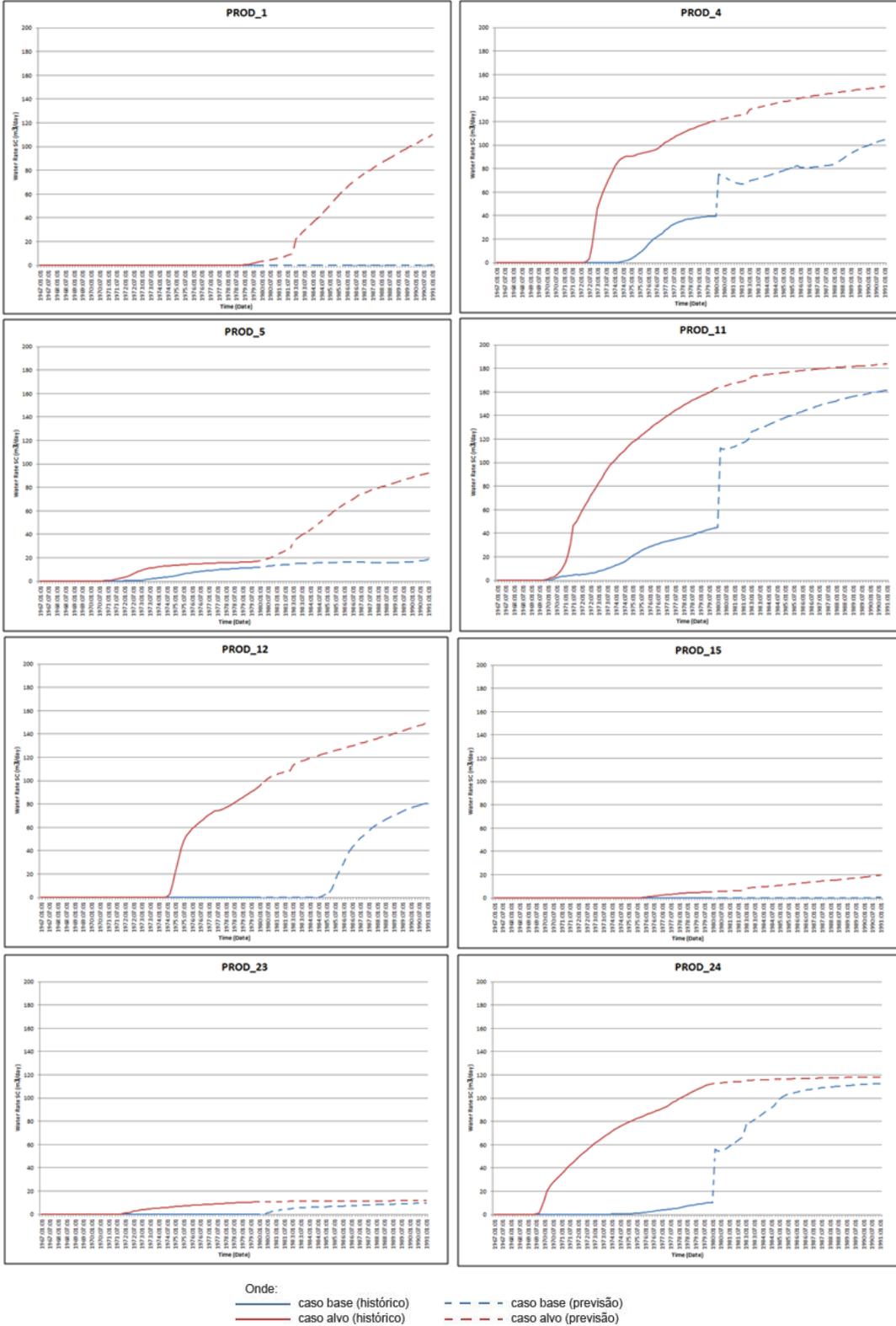


Figura 5.22: Curvas de produção de água. Caso base e alvo – Estudo II

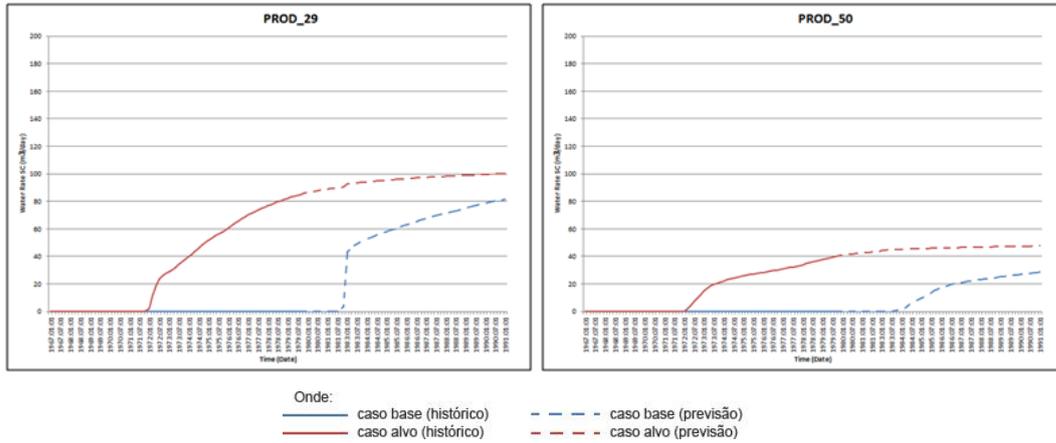


Figura 5.23: Curvas de produção de água. Caso base e alvo – Estudo II

5.2.1.3 Imagem de Treinamento

As camadas da imagem de treinamento utilizada pelo algoritmo *FILTERSIM* para reconstruir os mapas de permeabilidade e de porosidade são exibidas nas Figuras 5.24 e 5.25.

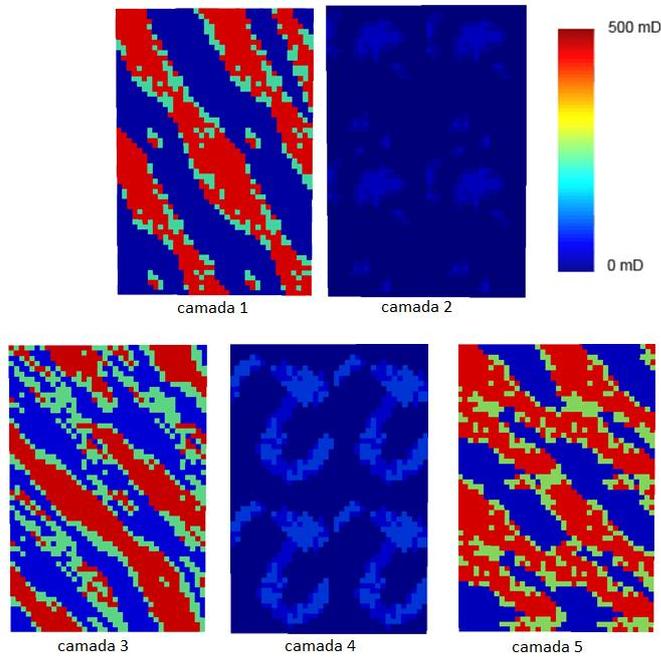


Figura 5.24: Imagem de treinamento para permeabilidade – Estudo II

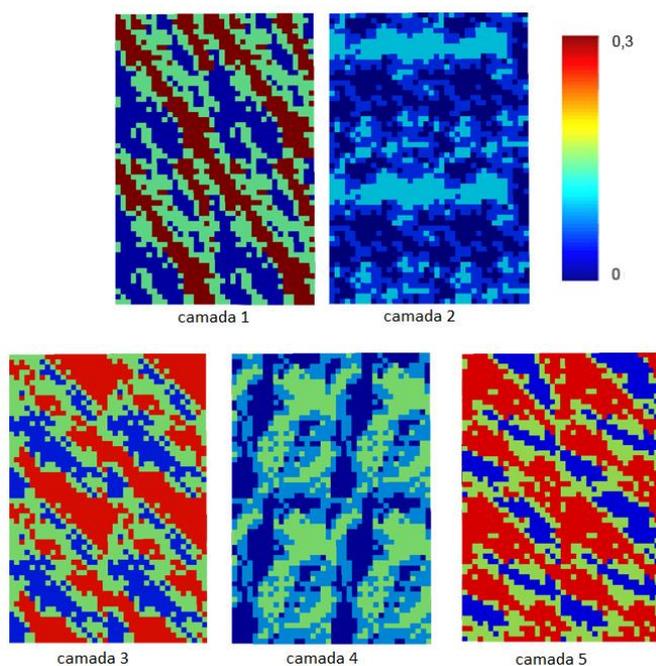


Figura 5.25: Imagem de treinamento para porosidade – Estudo II

5.2.2 Resultados

5.2.2.1 Descrição do Experimento

Os resultados deste estudo de caso foram gerados seguindo os procedimentos do experimento descrito na Seção 5.1. Este experimento consiste no ajuste das curvas de produção de água através da otimização simultânea dos mapas de permeabilidade e de porosidade.

O modelo de simulação de reservatório PUNQ_S3_MOD, definido na Seção 5.2.1.1, foi utilizado como caso alvo. O caso base utilizado como solução inicial foi definido na Seção 5.2.1.2. Este caso base representa o estado atual das propriedades do modelo de simulação e os erros apresentados na tentativa de reproduzir o comportamento do reservatório alvo, são exibidos na Tabela 5.5.

As imagens de treinamento utilizadas pelo algoritmo *FILTERSIM* para aplicação da estatística de múltiplos pontos foram apresentadas na Seção 5.2.1.3. A configuração dos parâmetros do algoritmo genético é exibida na Tabela 5.2.

5.2.2.2 Avaliação

Após a conclusão do processo de otimização, recuperou-se a melhor solução encontrada pelo algoritmo genético coevolutivo. Essa solução foi denominada de caso otimizado e, através do módulo de apresentação, foram geradas as curvas de produção de água para essa solução. Os gráficos exibidos nas Figuras 5.26 e 5.27 estão identificados com o nome do respectivo poço e representam a sua curva de produção de água.

Utilizando-se ainda o módulo de apresentação, foram calculados os erros no ajuste das curvas de produção de água no período considerado como histórico e como previsão. Também foram calculados os erros entre os mapas de porosidade e permeabilidade do caso otimizado em relação ao caso alvo. A Tabela 5.6 disponibiliza os valores obtidos e normalizados em relação ao caso base.

	$RMSE_p$		$RMSE_{m_por}$	$RMSE_{m_per}$
	Histórico	Previsão		
Caso Otimizado	0,17	0,05	0,38	0,37

Tabela 5.6: $RMSE_p$, $RMSE_{m_por}$ e $RMSE_{m_per}$ do caso otimizado – Estudo II

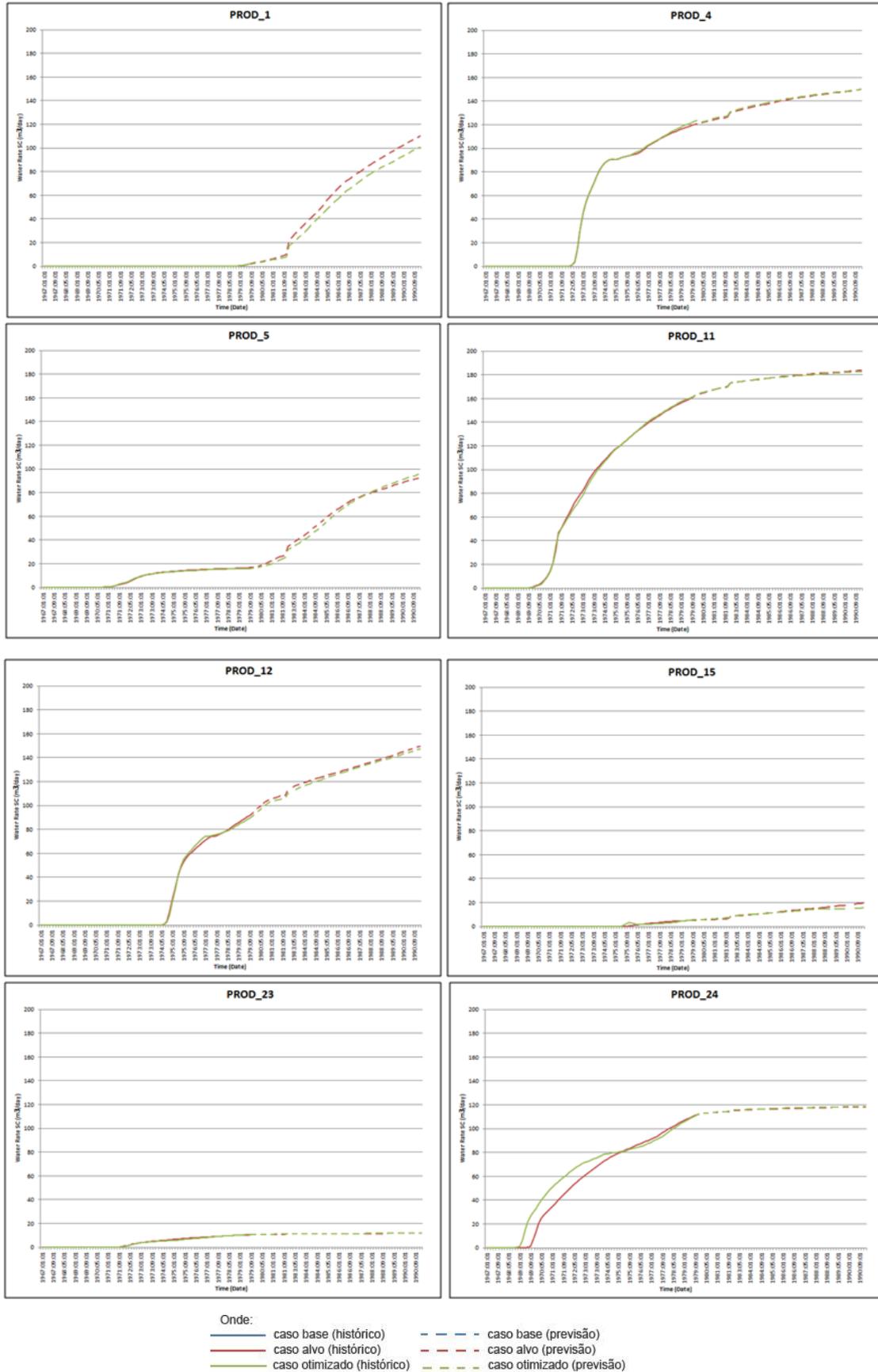


Figura 5.26: Curvas de produção de água. Caso otimizado – Estudo II

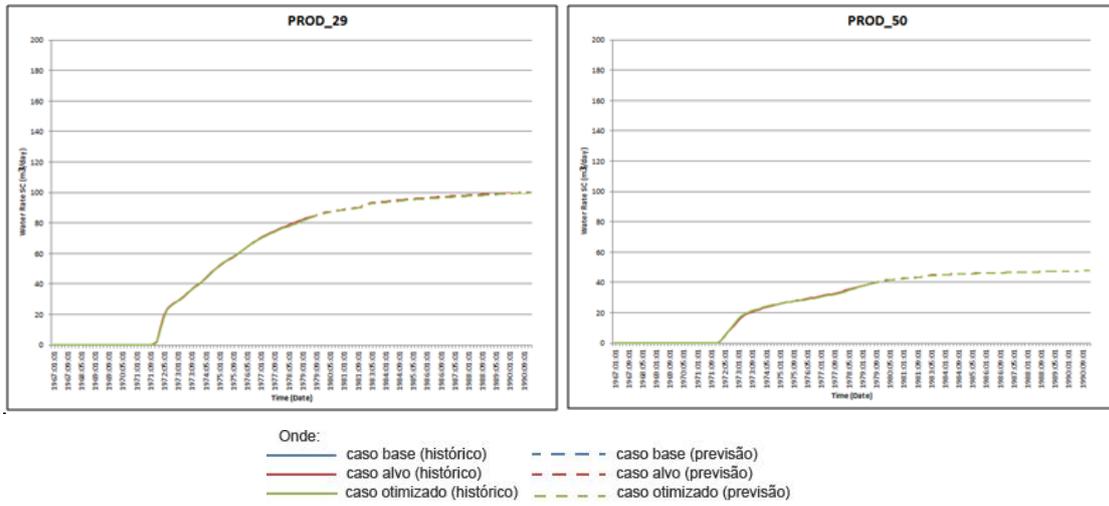


Figura 5.27: Curvas de produção de água. Caso otimizado – Estudo II

Os mapas de permeabilidade e de porosidade do caso otimizado, são exibidos, respectivamente, nas figuras 5.28 e 5.29.

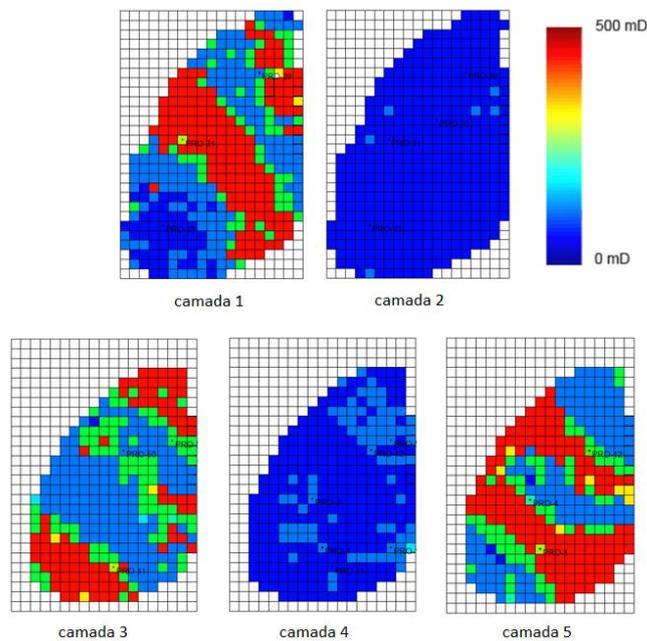


Figura 5.28: Mapa de permeabilidade do caso otimizado – Estudo II

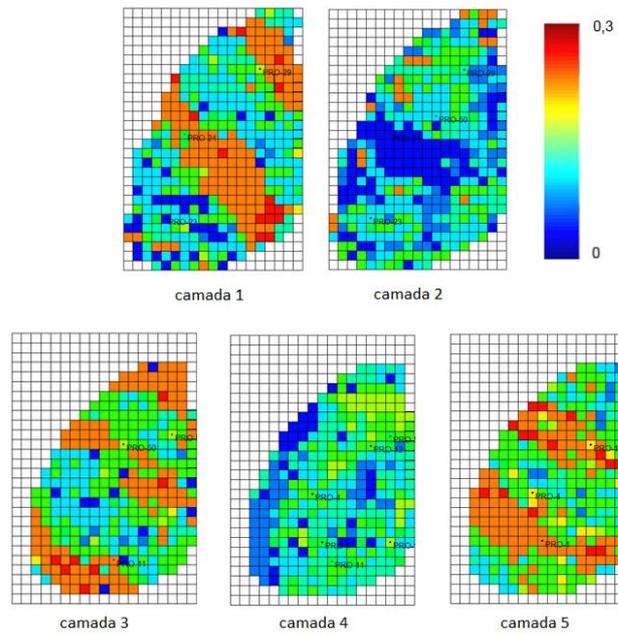


Figura 5.29: Mapa de porosidade do caso otimizado – Estudo II

A curva de evolução do algoritmo genético coevolutivo exibindo a melhor solução em cada geração é apresentada na Figura 5.30.

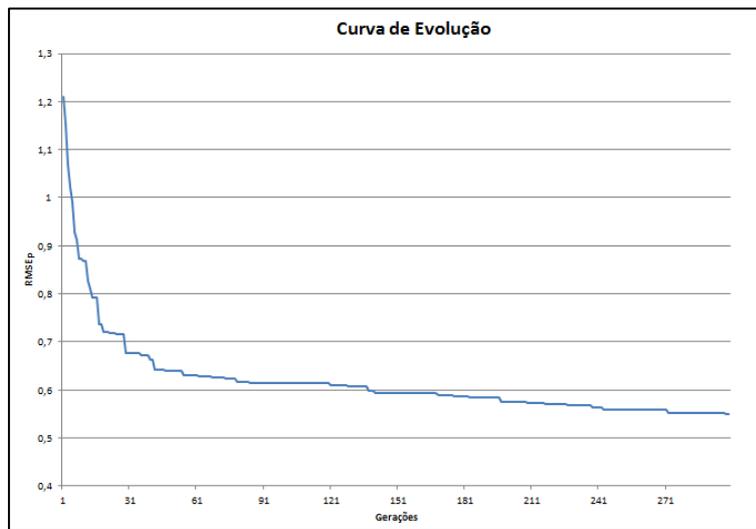


Figura 5.30: Curva de evolução da otimização – Estudo II

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo de solução desenvolvido realizou um ajuste satisfatório tanto das curvas de produção de água quanto dos mapas de permeabilidade e de porosidade, ao ser aplicado a um modelo de simulação que apresenta características de um reservatório real.

A redução do erro associado ao ajuste das curvas de produção para o período definido como histórico e para o período de previsão foram, respectivamente, de 83% e 95% em relação ao caso base de partida. O modelo de solução também apresentou reduções consideráveis no erro de ajuste dos mapas de permeabilidade e de porosidade. Estas reduções foram de 62% para o mapa de permeabilidade e de 63% para o mapa de porosidade.

É importante destacar que o modelo de solução otimizou as duas propriedades sem a necessidade de estabelecer uma lei ou função, explícita, que determine a relação entre as propriedades.

5.3 Estudo de Caso III

A fim de verificar os efeitos produzidos pelo novo operador de inicialização da população, do operador de cruzamento e do operador de mutação II propostos no Capítulo 4 desse trabalho, criou-se este estudo de caso onde foram realizadas algumas alterações no modelo de solução proposto por [3]. Neste estudo de caso serão realizadas duas análises abordando este modelo de solução adaptado. Os experimentos de casa análise utilizarão os mesmos casos, base e alvo, utilizados nos experimentos de Silva.

5.3.1 Modelo de Solução Adaptado

O Modelo Adaptado foi gerado através de algumas modificações realizadas no modelo de solução proposto por [3]. A substituição do operador responsável pela geração da população inicial entre cada rodada (experimento) executada, Seção 4.3, foi a primeira modificação realizada no modelo de solução apresentado por [3]. A segunda alteração foi realizada através da substituição do antigo operador de cruzamento, definido na Seção 5.5.1 de [3] pelo novo operador apresentado na Seção 4.2.3 desse trabalho. Por último, foi incluído o operador de mutação definido na Seção 4.2.5.

5.3.2 Análise I

Para avaliar o resultado dos operadores genéticos propostos nesse trabalho, utilizou-se o modelo adaptado, apresentado acima, para reproduzir o experimento realizado por [3]. O modelo de simulação de reservatório utilizado

nesta análise e constituído por uma malha tridimensional com 21 x 21 x 5 blocos (total de 2205) e apelidado de Xadrez é o mesmo utilizado por [3] em seu experimento.

No modelo Xadrez, todos os blocos têm a mesma dimensão e não existem blocos nulos nem falhas. Sua malha de drenagem é composta por 13 poços verticais, a exceção do mapa de permeabilidade, todas as propriedades do reservatório são homogêneas e permanecerão inalteradas.

O histórico de produção compreende um período de 10 anos, enquanto a previsão deve ser efetuada para os 5 anos seguintes. Durante os 10 anos iniciais, período de histórico, os poços produtores são controlados pela vazão de óleo, passando a serem controlados pela vazão de líquido (óleo + água) durante os 5 anos de previsão.

As camadas do mapa de permeabilidade do caso base utilizado por Silva e conseqüentemente por esta análise, estão exibidas na Figura 5.31. Os canais de alta permeabilidade e as barreiras de baixa permeabilidade estão destacados na camada de número 1. Os valores de $RMSE$ de produção para o período de histórico e de previsão, assim como o $RMSE$ do mapa de permeabilidade obtidos para o caso base são apresentados na tabela 5.7.

	$RMSE_p$ (m ³)		$RMSE_{m_per}$ (mD)
	Histórico	Previsão	
Caso Base	1239,92	927,47	4945,49

Tabela 5.7: $RMSE_p$ e $RMSE_{m_per}$ do caso base – Modelo Adaptado Análise I

O processo de otimização considerará, unicamente, o mapa de permeabilidade, como a propriedade de interesse durante o ajuste do histórico das curvas de produção de água de cada poço produtor. O algoritmo genético convencional foi configurado com os mesmos parâmetros utilizados por [3], sendo incluído o parâmetro *taxa de mutação II*. As configurações desses parâmetros são apresentadas na Tabela 5.8.

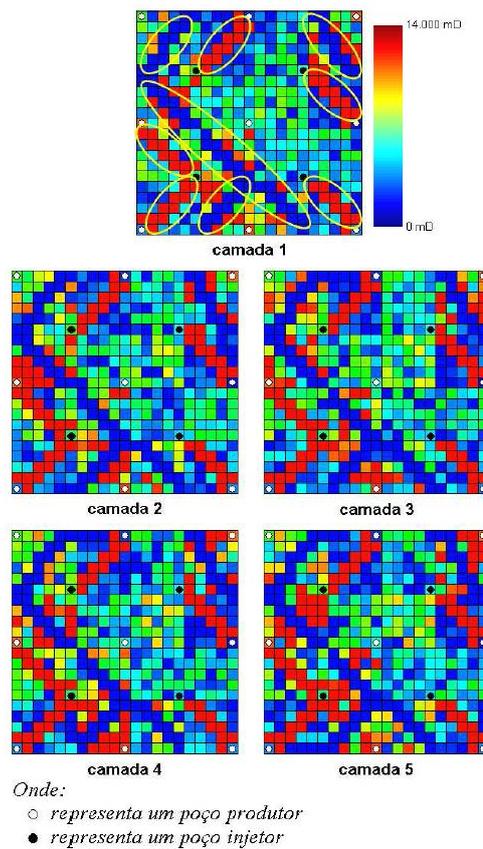


Figura 5.31: Mapa de permeabilidade do caso base – Estudo III – Análise I (fonte: Silva, 2011)

Parâmetro de Evolução	Valor
Tamanho da população	70
Número de gerações	30
Taxa de <i>steady state</i> (entre gerações)	0,20
Número de rodadas	10
Taxa de <i>steady state</i> (entre rodadas)	0,10
Taxa de cruzamento	0,85 - 0,50
Taxa de mutação I	0,08 - 0,25
Taxa de mutação II	0,10
Taxa de anulação	0,70

Tabela 5.8: Parâmetros de Evolução – Estudo III – Análise I

A imagem de treinamento utilizada pelo *FILTERSIM* para reconstruir o mapa de permeabilidade é exibida na Figura 5.32. Assim como os casos, base e alvo, esta imagem também foi a mesma utilizada durante o experimento realizado do por Silva.

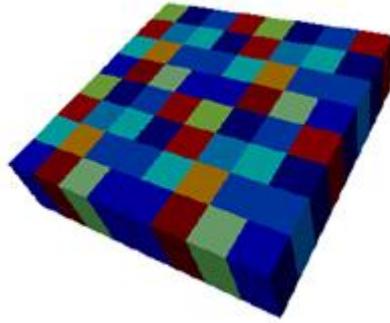
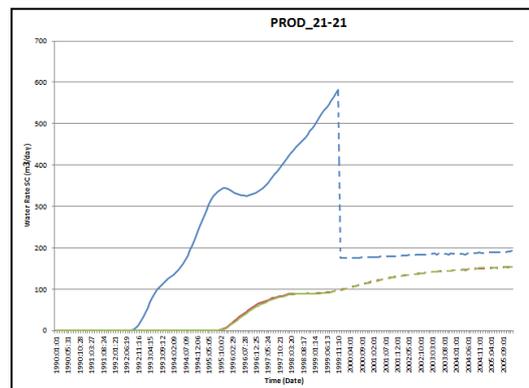


Figura 5.32: Imagem de Treinamento – Estudo III – Análise I

5.3.2.1 Avaliação

Após a conclusão do processo de evolução, foram geradas as curvas de produção de água referente ao período histórico e de previsão para cada poço. Estas curvas são apresentadas nas Figuras 5.33 e 5.34, onde cada gráfico está identificado com o nome do respectivo poço.



Onde:

- caso base (histórico)
- caso alvo (histórico)
- caso otimizado (histórico)
- - - caso base (previsão)
- - - caso alvo (previsão)
- - - caso otimizado (previsão)

Figura 5.33: Curvas de produção de água do caso otimizado – Estudo III – Análise I

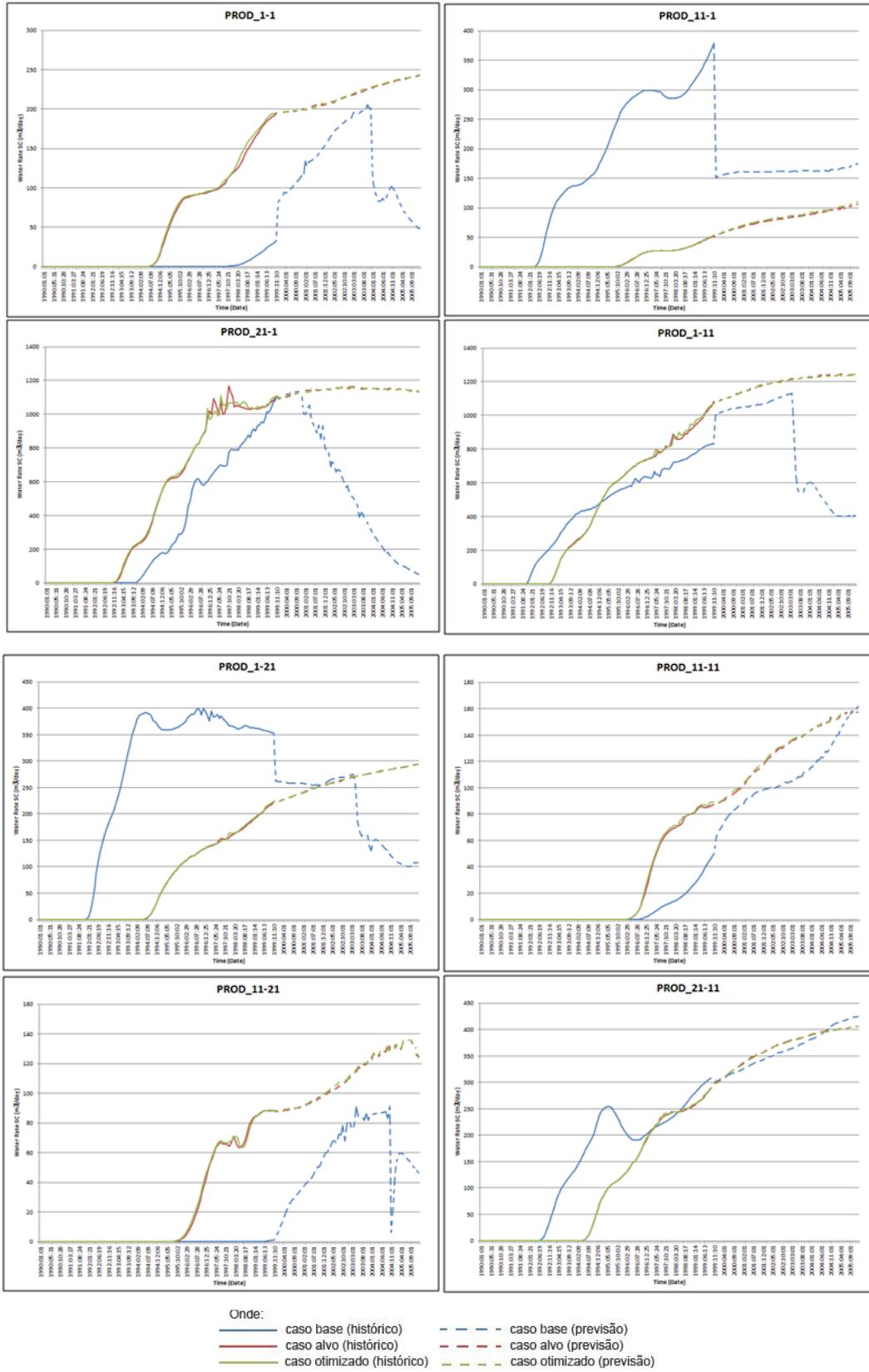


Figura 5.34: Curvas de produção de água do caso otimizado – Estudo III – Análise I

Para calcular o valor do $RMSE$ de produção e do mapa de permeabilidade, tomaram-se os valores obtidos para o caso base, apresentados na Tabela 5.7, como referência. O desempenho do Modelo de Solução Adaptado é mostrado na tabela 5.9.

	$RMSE_p$ (m ³)		$RMSE_{m_per}$ (mD)
	Histórico	Previsão	
Caso Otimizado	0,03	0,01	0,11

Tabela 5.9: $RMSE_p$ e $RMSE_{m_per}$ do caso otimizado – Estudo III – Análise I

O mapa de permeabilidade e a curva de evolução do algoritmo genético, resultantes do processo de otimização, são exibidos, respectivamente, nas Figuras 5.35 e 5.36.

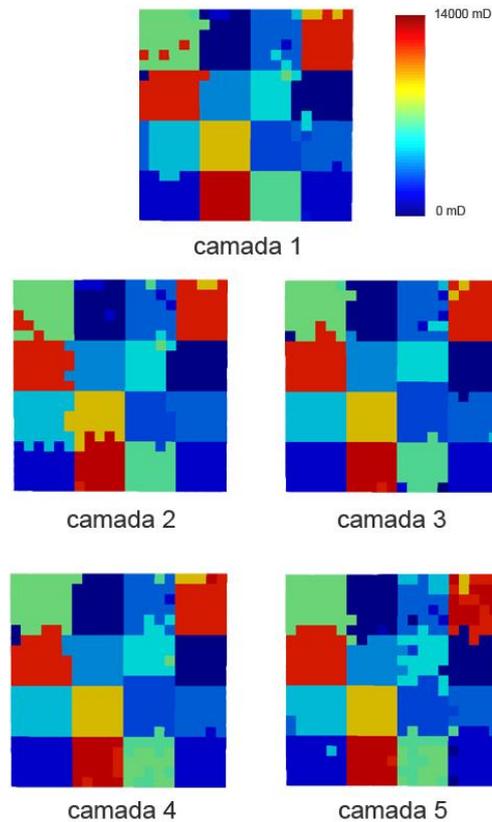


Figura 5.35: Mapa de permeabilidade do caso otimizado – Estudo III – Análise I

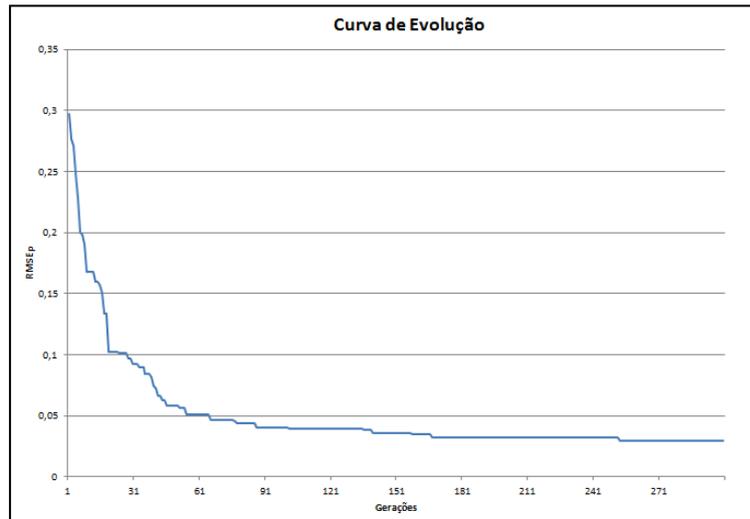


Figura 5.36: Curva de evolução da otimização – Estudo III – Análise I

De acordo com os resultados obtidos, o processo de otimização através do Modelo de Solução Adaptado encontrou melhores soluções do que o Modelo de Solução apresentado originalmente por Silva. Quando comparados, o modelo de solução adaptado apresentou menor erro de previsão de produção de água e principalmente, um mapa de permeabilidade melhor ajustado e apresentando um $RMSE_{m_per}$ 13% menor quando comparado com o modelo de solução original.

Os resultados sugerem que as alterações realizadas nos operadores de inicialização da população, cruzamento e a adição de outro operador de mutação guiou o algoritmo genético na direção de melhores soluções, capacitando-o a encontrar uma solução que ajustasse melhor não só as curvas de produção como também o mapa de permeabilidade do modelo de simulação do reservatório Xadrez, mostrando desempenho superior em relação ao seu antecessor.

5.3.3 Análise II

A segunda etapa de avaliação do resultado dos operadores genéticos propostos nesse trabalho utilizando o modelo adaptado, Seção 5.3.1, para reproduzir o experimento realizado por [3], definido como Caso 2 em sua tese de doutorado. O modelo de simulação de reservatório utilizado nesta análise é conhecido como PUNQ_S3. Ele é constituído por uma malha tridimensional de 19 x 28 x 5 blocos, totalizando 2660 blocos, dos quais 1761 estão ativos. Sua

malha de drenagem é composta por 10 poços verticais, sendo todos produtores, pois existe um intenso aquífero, abrangendo as regiões norte e oeste.

O histórico de produção compreende um período de 13 anos, enquanto a previsão deve ser efetuada para os 11 anos seguintes. Durante os 13 anos iniciais, período de histórico, os poços produtores são controlados pela vazão de óleo, passando a serem controlados pela vazão de líquido (óleo + água) durante os 11 anos de previsão. É importante destacar que o modelo original foi alterado para que todos os poços produtos entrassem em atividade no início do período de produção.

Assim como no modelo Xadrez, a exceção do mapa de permeabilidade, todas as propriedades do reservatório permanecerão inalteradas durante o processo de otimização. A Figura 5.37 exhibe cada camada do mapa de permeabilidade do caso alvo.

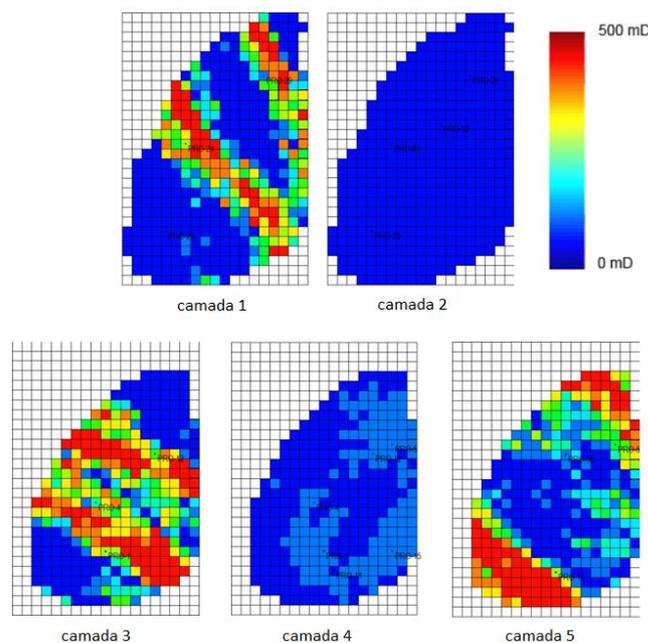


Figura 5.37: Mapa de permeabilidade do caso alvo – Estudo III – Análise II

As camadas do mapa de permeabilidade do caso base utilizado por Silva e, conseqüentemente, por esta análise, estão exibidas na Figura 5.38. O caso base foi gerado pela alteração dos valores de permeabilidade para mais ou para menos 80%. Além disso, foram criadas barreiras de baixa permeabilidade e canais de alta permeabilidade para alterar a chegada da frente de água nos poços. Os valores de *RMSE* de produção para o período de histórico e de

previsão, assim como o $RMSE$ do mapa de permeabilidade obtidos para o caso base são apresentados na Tabela 5.10.

	$RMSE_p$ (m ³)		$RMSE_{m_per}$ (mD)
	Histórico	Previsão	
Caso Base	27,27	12,73	386,78

Tabela 5.10: $RMSE_p$ e $RMSE_{m_per}$ do caso base – Estudo III – Análise II

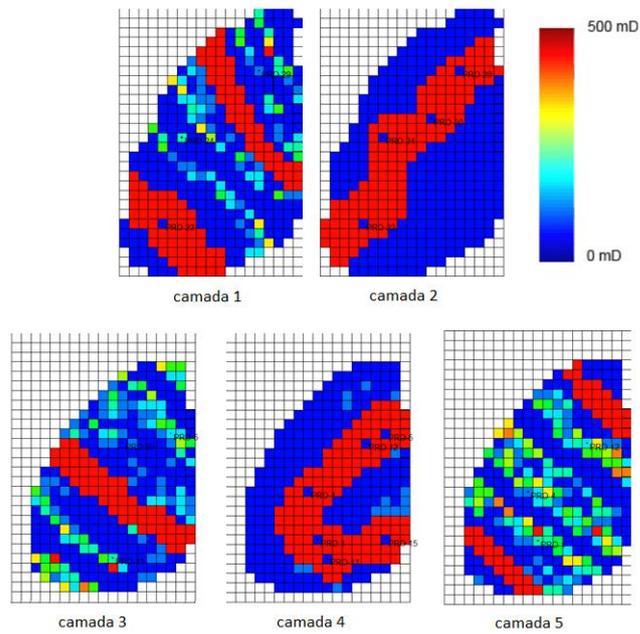
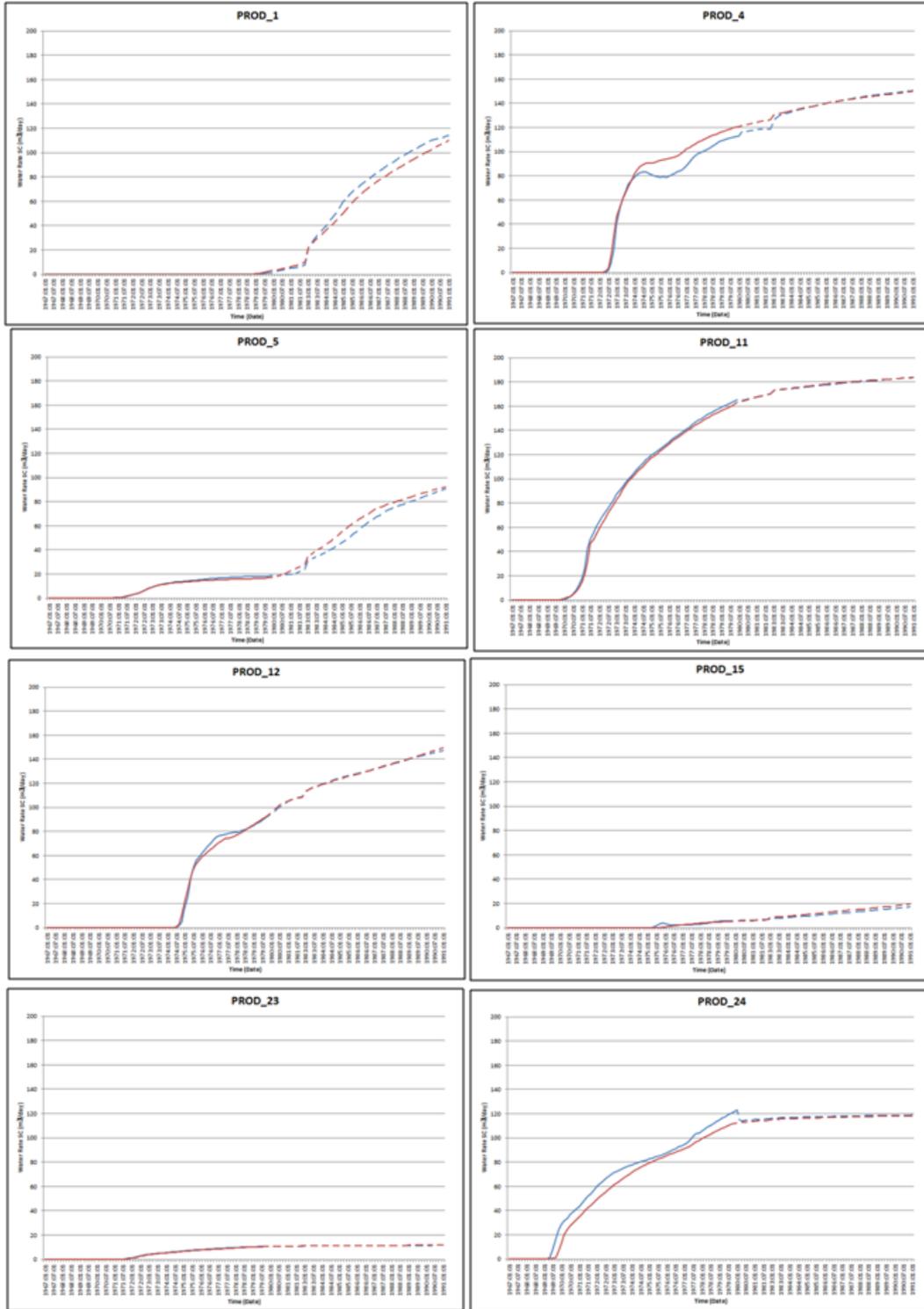


Figura 5.38: Mapa de permeabilidade do caso base – Estudo III – Análise II

As curvas de produção de água, para cada poço do caso base, são exibidas nas Figuras 5.39 e 5.40, onde cada gráfico está identificado com o nome do respectivo poço.



Onde:
— caso base (histórico) - - caso base (previsão)
— caso alvo (histórico) - - caso alvo (previsão)

Figura 5.39: Curvas de produção de água do caso base – Estudo III – Análise II

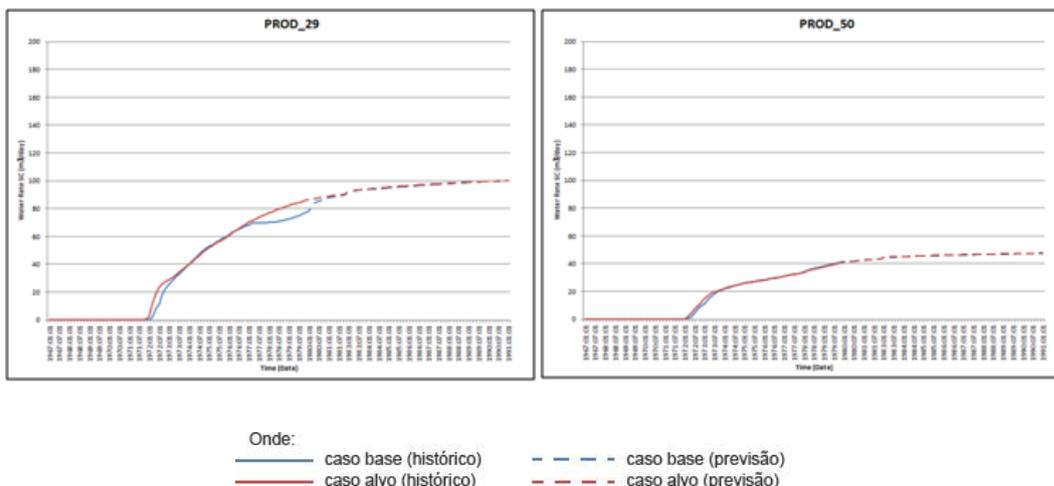


Figura 5.40: Curvas de produção de água do caso base – Estudo III – Análise II

O processo de evolução buscará um ajuste satisfatório do histórico das curvas de produção de água de cada poço produtor através da otimização do mapa de permeabilidade, mantendo todas as outras propriedades do reservatório inalteradas. O algoritmo genético convencional foi configurado com os mesmos parâmetros utilizados por [3]. As configurações desses parâmetros são mostradas na Tabela 5.11.

Parâmetro de Evolução	Valor
Tamanho da população	70
Número de gerações	30
Taxa de steady state (entre gerações)	0,20
Número de rodadas	10
Taxa de steady state (entre rodadas)	0,10
Taxa de crossover (cruzamento)	0,85 - 0,50
Taxa de mutação I	0,08 - 0,25
Taxa de mutação II	0,10
Taxa de anulação	0,70

Tabela 5.11: Parâmetros de Evolução – Estudo III – Análise II

As camadas da imagem de treinamento utilizada pelo *FILTERSIM* para reconstruir o mapa de permeabilidade são exibida na Figura 5.41. Assim como os casos, base e alvo, esta imagem também foi a mesma utilizada durante o experimento realizado do por Silva.

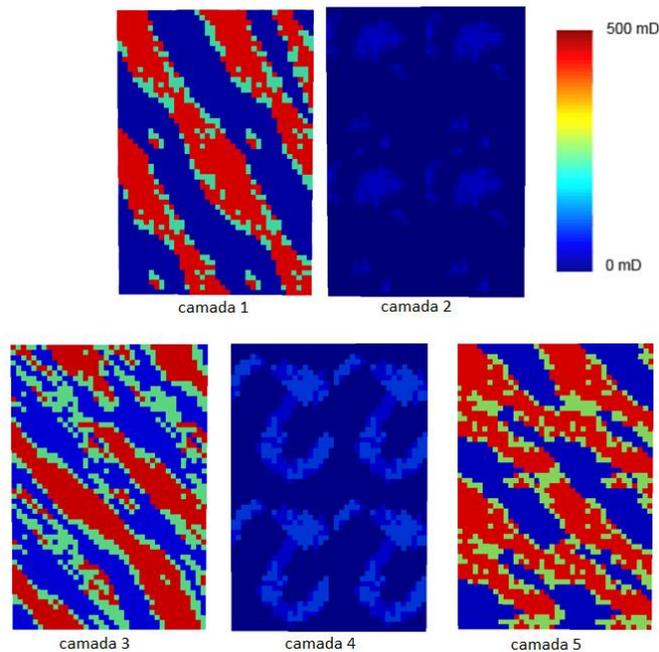


Figura 5.41: Imagem de Treinamento – Estudo III – Análise II

Segundo [3], em cada camada da imagem de treinamento, os padrões são representados por três possíveis valores. Esses valores foram obtidos submetendo o mapa de permeabilidade original a um processo de agrupamento definido no apêndice B de sua tese de doutorado. Após a formação dos grupos, os valores de permeabilidade originais, de cada bloco, foram substituídos pelo valor do centroide do grupo ao qual o bloco foi associado. Em seguida, a imagem obtida foi replicada na horizontal e na vertical a fim de obter repetições dos padrões encontrados. Desse modo, a imagem de treinamento resultante apresenta um padrão de comportamento semelhante à propriedade alvo sem reproduzi-la fielmente.

5.3.3.1 Avaliação

As Figuras 5.42 e 5.43 exibem as curvas de produção de água, geradas a partir do caso otimizado, ou seja, da melhor solução encontrada pelo modelo de solução durante o processo evolutivo. Estes gráficos estão identificados com o nome do respectivo poço.

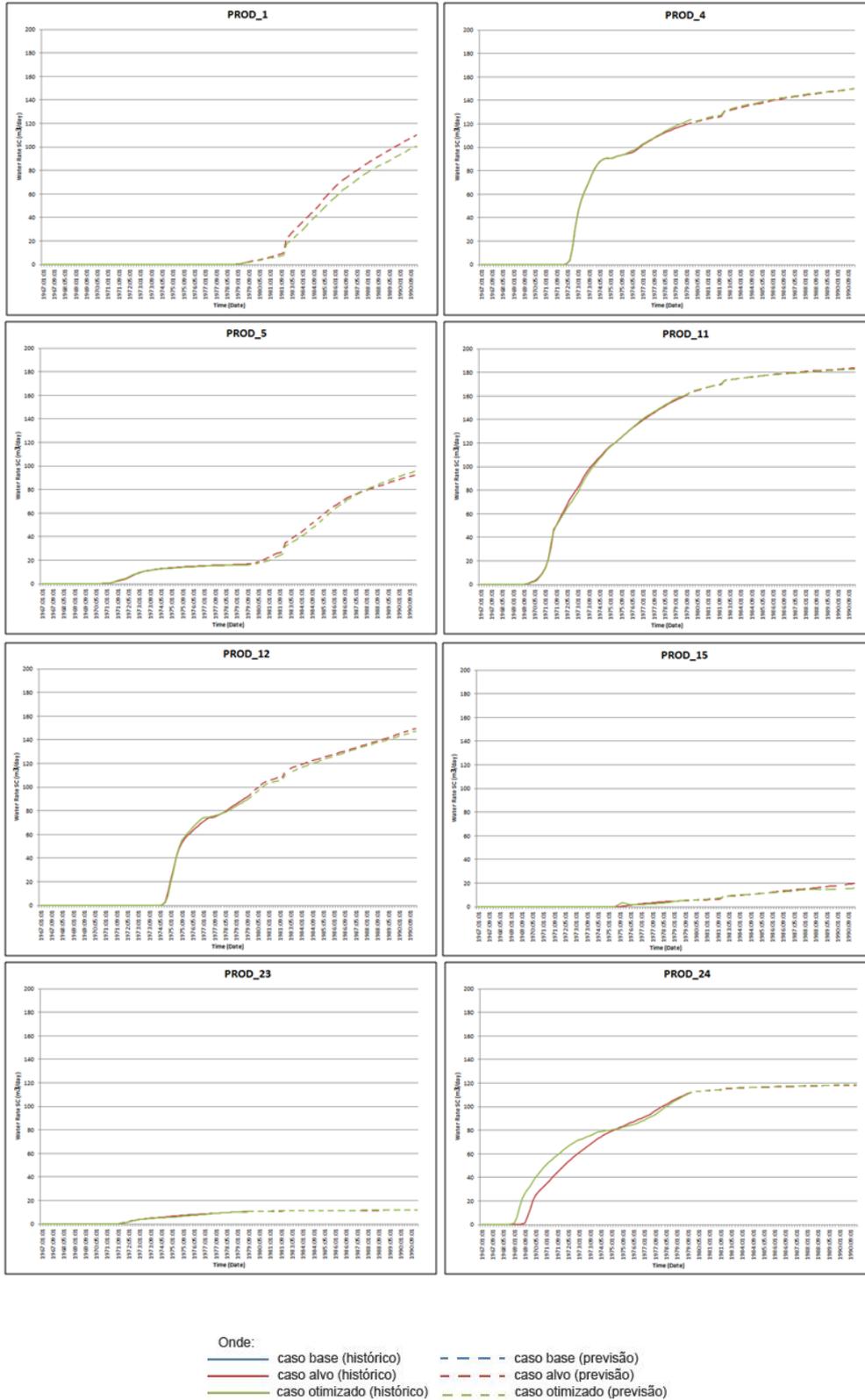


Figura 5.42: Curvas de produção de água do caso otimizado – Estudo III – Análise II

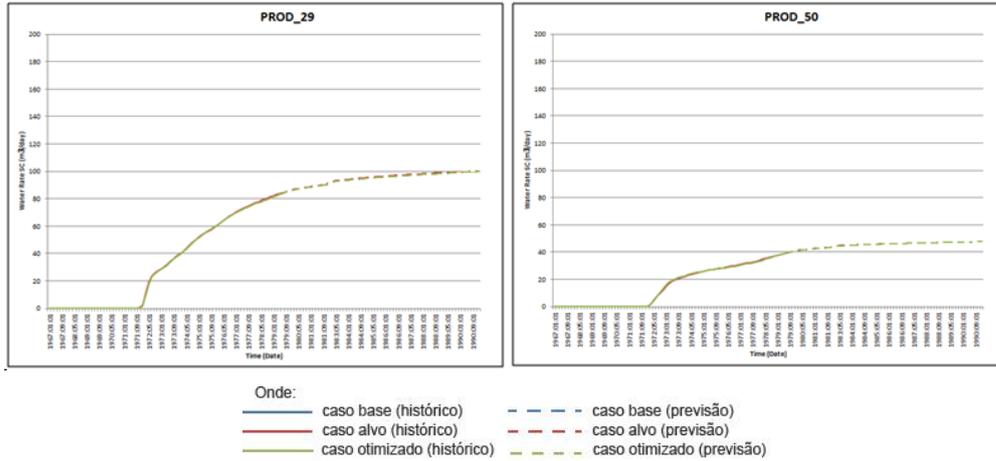


Figura 5.43: Curvas de produção de água do caso otimizado – Estudo III – Análise II

Para o cálculo do valor do *RMSE* de produção e do mapa de permeabilidade, tomaram-se os valores obtidos para o caso base, apresentados na Tabela 5.10, como referência. O desempenho do Modelo de Solução Adaptado é mostrado na Tabela 5.13.

	RMSE_p (m³)		RMSE_{m_per} (mD)
	Histórico	Previsão	
Caso Otimizado	0,54	0,81	0,35

Tabela 5.13: *RMSE_p* e *RMSE_{m_per}* do caso otimizado – Estudo III – Análise II

O mapa de permeabilidade e a curva de evolução do algoritmo genético, resultantes do processo de otimização, são exibidos, respectivamente, nas Figuras 5.44 e 5.45.

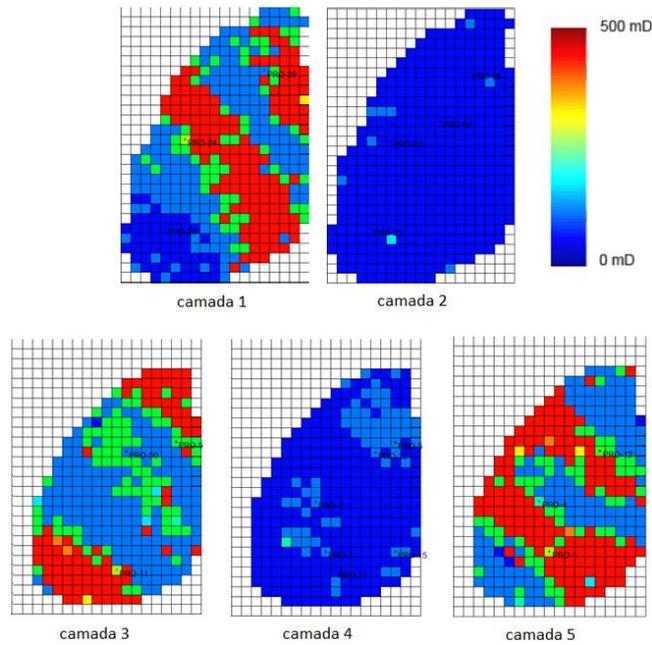


Figura 5.44: Mapa de permeabilidade do caso otimizado – Estudo III – Análise II

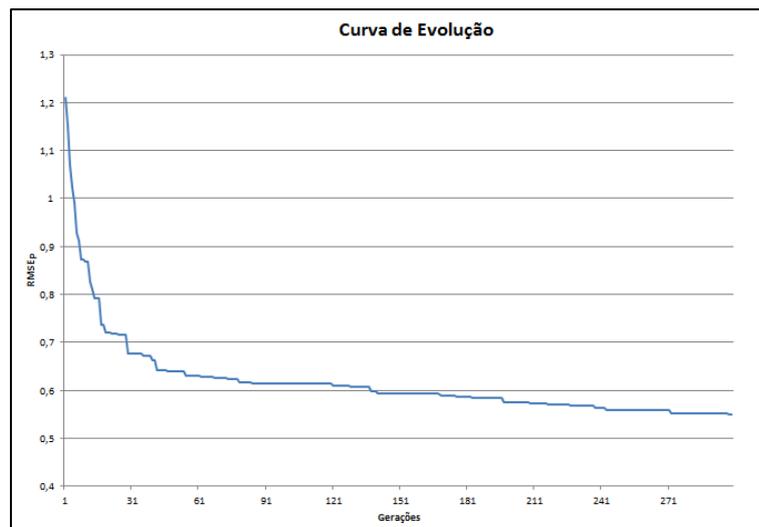


Figura 5.45: Curva de evolução da otimização – Estudo III – Análise II

Apesar de o caso base apresentar um mapa de permeabilidade com uma conformação geológica bem distante do caso alvo, as curvas de produção estão razoavelmente ajustadas [3]. Esse pequeno erro de ajuste, entre as curvas, aumenta a complexidade do problema e dificulta a localização de uma solução melhor.

Mesmo em meio a este cenário adverso, o algoritmo genético conseguiu encontrar uma solução que apresentasse um ajuste melhor entre as curvas. A

Tabela 5.13 mostra que o modelo de otimização encontrou uma solução que diminuiu o erro de ajuste em 46% para o período considerado como histórico e para o período de previsão houve uma redução de 19% no *RMSE*. Entretanto a mais importante e notória foi a redução de 65% no erro *RMSE* do mapa de permeabilidade.

Quando comparados, o Modelo de Solução Adaptado apresentou menor erro de ajuste das curvas de produção do que o modelo original, conseguindo alcançar uma redução de 25% do *RMSE* para o período de histórico. A solução encontrada também apresentou um mapa de permeabilidade com um erro de ajuste 19% menor, promovendo assim uma redução de 11% no valor de *RMSE* de previsão em relação a melhor solução apresentada pelo modelo de otimização original.

Os resultados obtidos nas Análises I e II sugerem que as alterações realizadas nos operadores de inicialização da população, cruzamento e a adição de outro operador de mutação guiaram o algoritmo genético na direção de melhores soluções, capacitando-o a encontrar uma solução que ajustasse melhor tanto a curva de produção como também o mapa de permeabilidade do modelo de simulação do reservatório PUNQ_S3, mostrando desempenho superior em relação ao seu antecessor.

Portanto, é possível concluir que os novos operados apresentados nesse trabalho proporcionaram a localização de melhores soluções tanto para o modelo coevolutivo quanto para o convencional [3]. A aplicação do modelo de solução ao ajuste de mais de uma propriedade também corrobora a afirmação de que o modelo é suficientemente genérico para ser aplicado a qualquer propriedade do reservatório.