

USO DA KRIGAGEM ORDINÁRIA NA SUA VIZAÇÃO DE PERFIS GEOFÍSICOS DE POÇOS

José Agnelo Soares¹; Ailma R. S. de Medeiros²; Denise Ágatha R. Almeida²; Lígia Mara Gonzaga²

RESUMO - Este trabalho analisa o efeito de aumento da escala de investigação dos perfis de raios gama de doze poços, todos oriundos de um campo terrestre produtor de petróleo, pela aplicação da técnica de *krigagem* ordinária 1D. Antes da *krigagem* os dados foram padronizados, sendo convertidos de volta à escala normal dos perfis de raios gama (API), após a estimação por *krigagem*. Três diferentes espaçamentos entre pontos de *krigagem* foram testados, em cada poço, e as curvas *krigadas* de raios gama (GR) foram comparadas com a curva de GR original em termos do coeficiente de correlação, do erro RMS e do espectro de frequências espaciais, este último representado pelo comprimento de onda mínimo de cada curva. Os resultados alcançados indicam que o aumento da distância entre pontos de *krigagem* resulta em curvas de menor resolução vertical, embora conservando a capacidade de reconhecer as feições de maior escala presentes nos perfis. Enquanto os perfis GR originais apresentam resolução na escala métrica, as curvas *krigadas* obtidas apresentam resolução nas escalas de dezenas a centenas de metros. Finalmente, a metodologia aplicada neste trabalho pode ser aplicada a qualquer perfil geofísico de poço.

Palavras-chave: Perfis geofísicos de poços, geoestatística, *krigagem*, mudança de escala.

USE OF ORDINARY KRIGING IN SMOOTHING GEOPHYSICAL PROFILES OF WELLS

ABSTRACT - This work analyzes the effect of increasing the scale of gamma ray well logs from twelve wells, all from an oil producer terrestrial field, by applying the technique of ordinary kriging. Before kriging, data were normalized, being converted back to the normal range of gamma ray logs (API), after estimation through kriging. Three different spacing between points of kriging were tested in each well, and the krigged gamma curves (GR) were compared with the original GR curve in accordance with the correlation coefficient, the RMS error and the spectrum of spatial frequencies, the latter represented by the minimum wavelength of each curve. The results indicate that increased distance between points of kriging results in lower vertical resolution curves, while retaining the ability to recognize the larger scale features present in logs. While GR original logs exhibit resolution in metric scale, krigged logs show resolution on scales of tens to hundreds of meters. At last, but not least, the methodology applied in this work can be applied to any geophysical well log.

Keywords: Geophysical well logs, geostatistics, kriging, scale change.

¹Professor Adjunto III, DSc, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, CTRN/UFCG.
E-mail: agnelo@dmg.ufcg.edu.br

²Graduanda em Engenharia de Minas, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, CTRN/UFCG.

INTRODUÇÃO

Os perfis geofísicos de poços se constituem nos dados geofísicos de campo de mais alta resolução vertical adquiridos para fins de exploração dos recursos naturais subterrâneos. A resolução vertical precisa depende do tipo de perfil e das características construtivas de cada modelo de sonda ou fabricante; mas de modo geral, pode-se afirmar que para as curvas tradicionais (raios gama, resistividade elétrica, potencial espontâneo, densidade, sônico e porosidade de nêutrons), a resolução se situa na escala métrica (Hearst et al., 2000).

A interpretação geofísica para fins de exploração sempre se baseia no cruzamento das informações disponíveis, em geral oriundas de levantamentos geológicos e geofísicos (de superfície e de poço), os quais apresentam diversas escalas de investigação. Por exemplo, os métodos geofísicos de superfície fornecem dados que, em geral, apresentam uma resolução vertical muito inferior àquela dos dados fornecidos pela geofísica de poço. A maioria dos dados geológicos também apresenta uma baixa resolução, tanto vertical quanto horizontal. A interpretação integrada desses dados exige a adoção de uma escala única de investigação, em geral obtida pelo aumento de escala (ou a equivalente redução de resolução) dos perfis geofísicos de poços (Hwang, 2009). Outras aplicações também exigem esse aumento da escala de investigação dos perfis. Por exemplo, quando se deseja modelar o regime de fluxo de um reservatório não interessa considerar todas as unidades geológicas, mas apenas aquelas principais, responsáveis pelo controle do regime de fluxo de fluidos.

Há também casos em que se deseja diminuir a escala de investigação, o que pode ser obtido pela incorporação de informações oriundas de uma fonte de mais alta resolução. De um modo geral, mudanças de escala (para cima ou para baixo) devem sempre ser consideradas quando se deseja trabalhar com dados de diferentes níveis de resolução.

METODOLOGIA

Neste trabalho foram utilizados os perfis de raios gama (GR) oriundos de doze poços de um campo terrestre produtor de petróleo. Foi realizado um trabalho de aumento de escala dos perfis GR com o objetivo de identificar as camadas geológicas mais importantes do campo. O método adotado foi o da *krigagem* ordinária em uma dimensão (1D).

Os programas computacionais usados para o processamento geoestatístico dos dados foram o GSLIB[®] e o GS+[®]. Inicialmente o GSLIB[®] foi utilizado na análise da distribuição estatística e na normalização dos dados (geração de uma variável de escores com distribuição normal padrão). Em seguida o programa GS+[®] foi utilizado na definição do modelo de variograma e na *krigagem* ordinária 1D com três separações distintas entre pontos de estimação: 5 m, 20 m e 50 m. Finalmente, o programa GSLIB[®] foi utilizado para a realização da transformação inversa, ou seja, transformar os valores *krigados* da variável normalizada em valores de GR.

Dados utilizados

Os perfis de GR precisaram ser re-amostrados, pois o módulo de normalização da versão utilizada do GSLIB[®] processa apenas mil amostras por vez, e os perfis de alguns poços apresentam um número superior de amostras. A fim de reduzir o número de amostras, os perfis de GR foram re-amostrados com intervalos de amostragem de 2,0 m, 3,048 m e 4,0 m; de acordo com a taxa de redução necessária no número de amostras de cada poço. Os perfis resultantes dessa re-amostragem são referidos neste trabalho apenas pela sigla GR.

A Figura 1 apresenta um mapa de localização dos poços. As coordenadas estão propositalmente alteradas de modo a não identificar a localização exata do campo, por razões de sigilo industrial. No entanto, as distâncias entre poços são as reais.

Krigagem

O método da *krigagem* trata-se de uma forma de estimar valores em locais não-amostrados com base nas amostras conhecidas e localizadas na sua vizinhança. A influência de cada amostra vizinha ao ponto de estimação da variável é determinada com base no comportamento da continuidade espacial do fenômeno estudado. A *krigagem* garante a melhor estimativa possível através da minimização da variância de estimativa, ou seja, a incerteza associada ao conjunto de valores estimados é sempre a mínima possível com os valores amostrados disponíveis (Guerra, 1988; Kitanidis, 1997; Dubrule, 2003). Esse método pode ser utilizado na interpolação de dados, sendo esta baseada no variograma, conforme apresentado por Journel e Huijbregts (1978).

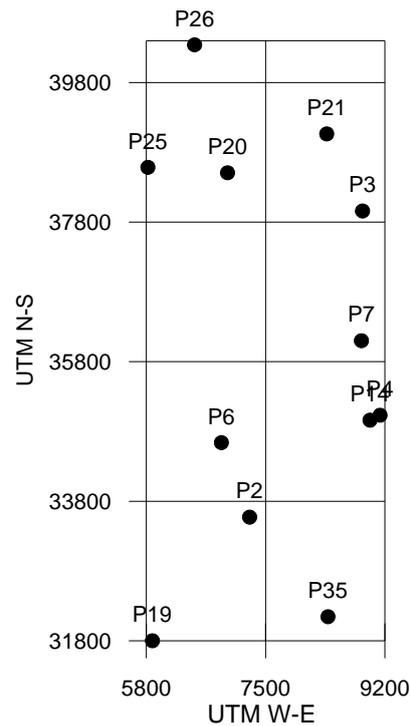


Figura 1 – Mapa de localização dos poços.

O variograma representa a variância espacial dos dados, ou seja, caracteriza o fenômeno estudado em termos da sua continuidade espacial. O comportamento experimental dos dados é representado através de uma função espacialmente contínua (modelo teórico de variograma) a qual permite estimar a influência de cada amostra, qualquer que seja a sua distância em relação ao ponto a ser estimado.

A Figura 2 apresenta o variograma experimental para o poço P3 com ajuste do modelo teórico de variograma. Neste caso o melhor ajuste ($R^2 = 0.97$) foi alcançado com o modelo exponencial.

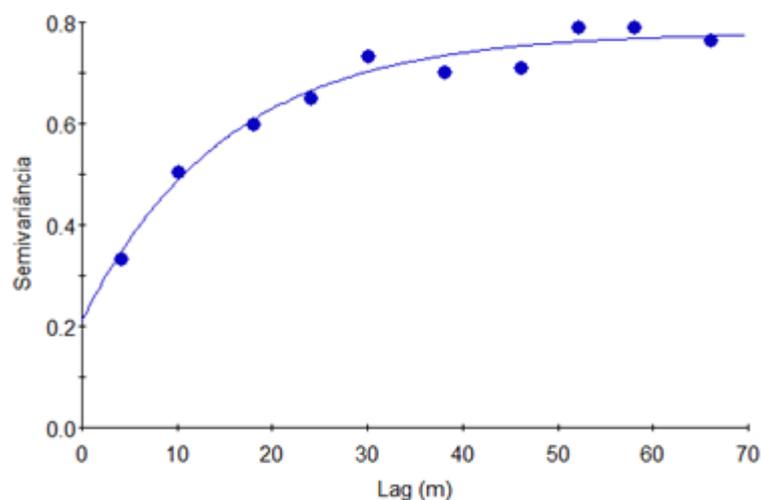


Figura 2 - Ajuste de variogramas para o poço P3.

Fluxograma de trabalho

O procedimento adotado neste trabalho seguiu o fluxograma apresentado na Figura 3.

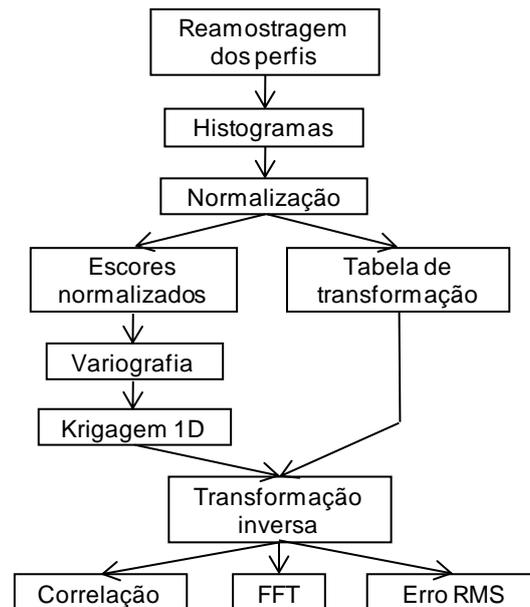


Figura 3 - Fluxograma com o procedimento adotado.

O procedimento começa com a re-amostragem dos perfis, seguido pela construção dos histogramas para o perfil GR re-amostrado de cada poço e normalização das curvas. Esta última etapa resulta em dois arquivos para cada poço: um arquivo com os dados normalizados e outro contendo uma tabela de transformação que permite relacionar os valores normalizados com os valores de GR.

Em seguida é realizada a variografia, que gera o modelo teórico de variograma representativo da continuidade espacial do fenômeno investigado. Esse modelo teórico de variograma é em seguida utilizado para a definição da influência de cada amostra localizada na vizinhança dos pontos de estimação por *krigagem*.

Na *krigagem* foram estimados valores com três separações diferentes entre pontos de estimação (5 m, 20 m e 50 m), de modo que a curva *krigada* com maior separação entre pontos *krigados* representa a curva mais suavizada e com maior escala de investigação. A curva obtida com separação dos pontos de *krigagem* de 5 m apresenta a menor escala, e a de 20 m apresenta uma escala de investigação intermediária. Em seguida cada curva *krigada* é submetida a uma transformação inversa (de acordo com a tabela de transformação) para gerar os perfis *krigados* de GR com as três escalas de investigação adotadas.

A etapa seguinte foi comparar as três curvas GR *krigadas* com a curva de GR original (GR re-amostrado). Os parâmetros adotados para essa comparação foram o coeficiente de correlação, o erro RMS e a frequência espacial (representada pelo número de onda e obtida pela aplicação da transformada de Fourier 1D).

O coeficiente de correlação indica o quanto cada curva *krigada* mantém uma relação linear em comparação à curva original. Quanto mais este parâmetro se aproxima da unidade mais diretamente correlacionáveis são as curvas comparadas. Para o cálculo do coeficiente de correlação é necessário que as duas curvas apresentem o mesmo número de amostras. Deste modo as curvas *krigadas* foram re-amostradas a fim de exibirem o mesmo número de amostras das respectivas curvas GR originais.

O erro RMS indica a diferença média quadrática entre duas variáveis. Quanto menor o erro RMS, mais próximos são, em média, os valores das curvas comparadas. Para o cálculo do erro RMS as duas curvas comparadas também devem apresentar o mesmo número de amostras.

A transformada de Fourier no domínio do espaço permite avaliar o conteúdo de frequências espaciais de uma dada curva. A frequência espacial é representada pelo número de onda. Valores baixos de número de onda indicam que apenas feições de grande porte podem ser reconhecidas em uma dada curva, ou seja, que se trata de uma curva que investiga feições de grande escala. Por outro lado, a ocorrência de valores mais elevados de número de onda para uma dada curva indica a possibilidade do reconhecimento de feições de pequena escala. Deste modo, o número de onda é inversamente proporcional à escala de investigação de uma dada curva.

RESULTADOS

A Figura 4 apresenta uma comparação da curva original com as curvas *krigadas* com as distâncias entre pontos de *krigagem* de 5, 20 e 50 m. Observa-se que as curvas *krigadas* apresentam uma redução na resolução com o aumento da escala de investigação, resultante do aumento da distância entre pontos de *krigagem*. No entanto, as feições de maior escala estão perfeitamente preservadas em todas as curvas.

A Figura 5 apresenta os coeficientes de correlação calculados entre as curvas GR *krigadas* (com as separações de 5, 20 e 50 m entre pontos de *krigagem*) e a curva GR original, para todos os 12 poços investigados.

A Figura 6 apresenta o erro RMS calculado também entre cada curva GR *krigada* e a respectiva curva GR original, para todos os poços estudados.

A Figura 7 relaciona o coeficiente de correlação com o erro RMS calculados para cada poço e para cada curva GR *krigada*. Em geral, a distância entre pontos de *krigagem* é diretamente proporcional ao erro RMS e inversamente proporcional ao coeficiente de correlação, calculados em relação à curva GR original.

A Figura 8 apresenta a distribuição de frequências espaciais, obtidas pela aplicação da transformada de Fourier 1D, para a curva de GR original e para as respectivas curvas de GR *krigadas*. A título de exemplo, são apresentadas as curvas referentes ao poço P35.

A Tabela 1 apresenta os valores de coeficiente de correlação e erro RMS calculados para cada curva *krigada*, em relação à respectiva curva de GR original, e o comprimento de onda mínimo de cada curva de GR (original e *krigadas*) para todos os 12 poços investigados. Observar que o número de onda máximo para cada curva, extraído de gráficos como o da Figura 8, foi transformado no comprimento de onda mínimo.

Tabela 1 – Valores de coeficiente de correlação e erro RMS das curvas *krigadas* em relação à curva de GR original, e comprimento de onda (λ) mínimo para as curvas de GR original e *krigadas* para todos os poços investigados.

Poço	Corr_05	Corr_20	Corr_50	RMS_05 (API)	RMS_20 (API)	RMS_50 (API)	λ_{GR} (m)	λ_{05} (m)	λ_{20} (m)	λ_{50} (m)
2	0.85	0.72	0.51	6.3	8.1	10.1	38	105	157	314
3	0.89	0.81	0.66	6.8	8.9	11.4	50	126	157	314
4	0.87	0.72	0.58	4.6	6.4	7.4	38	79	140	314
6	0.82	0.78	0.66	7.5	8.2	9.8	38	79	143	393
7	0.89	0.67	0.42	6.5	10.0	12.5	51	90	157	370
14	0.96	0.81	0.80	6.0	14.0	13.0	51	90	126	314
19	0.76	0.76	0.65	9.3	9.4	11.0	38	79	140	209
20	0.86	0.73	0.56	8.1	10.9	13.3	38	84	157	180
21	0.87	0.78	0.63	9.1	11.8	14.7	51	79	157	314
25	0.90	0.80	0.65	11.9	16.4	21.2	25	79	157	314
26	0.81	0.75	0.63	10.3	11.6	13.8	51	105	157	349
35	0.92	0.87	0.78	9.5	12.3	15.5	38	79	157	209

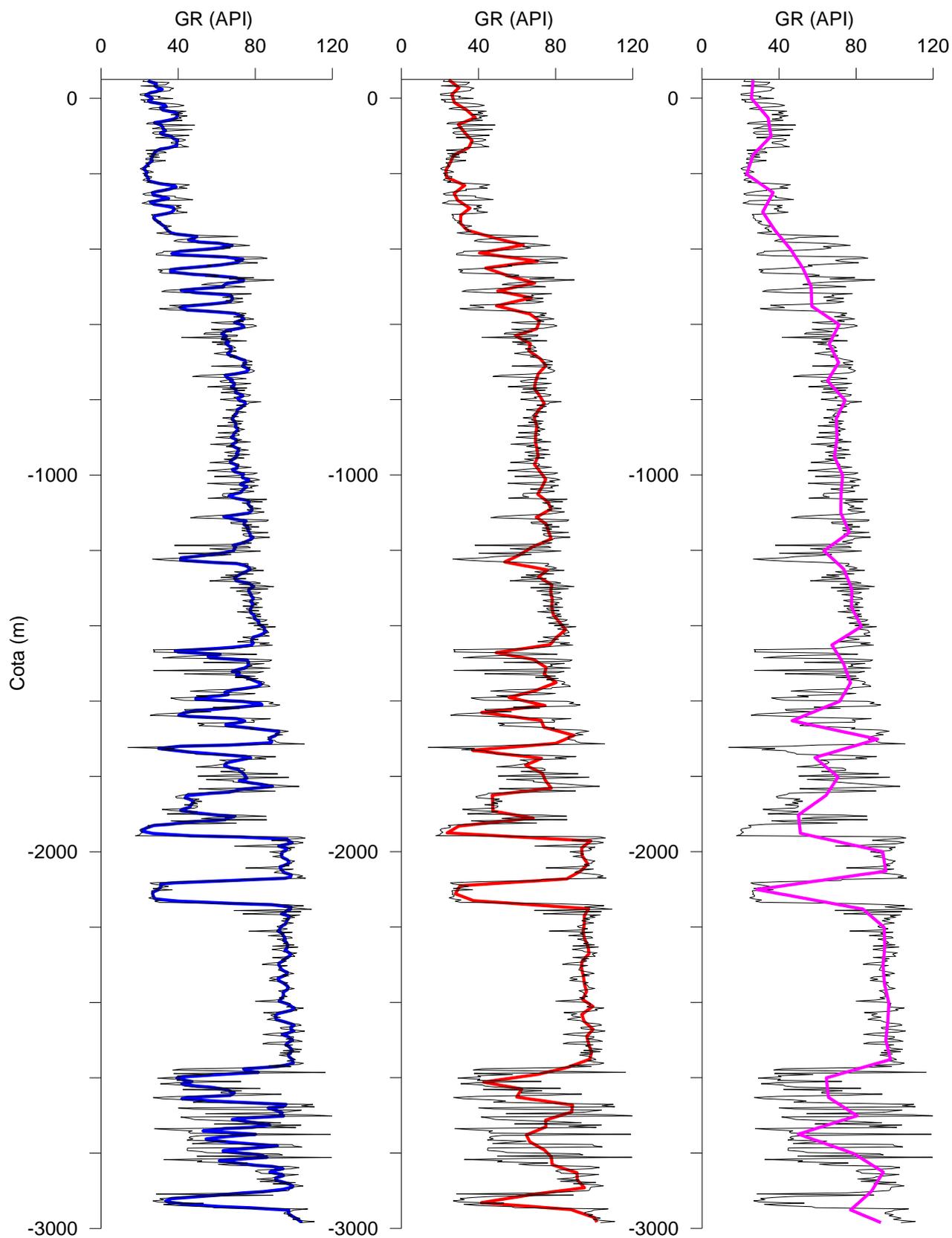


Figura 4 - GR original (curva preta) e perfis de GR *krigados* em 1D para distâncias entre pontos de *krigagem* de 5,0 m (curva em azul), 20,0 m (curva em vermelho) e 50,0 m (curva em rosa) para o poço P35.

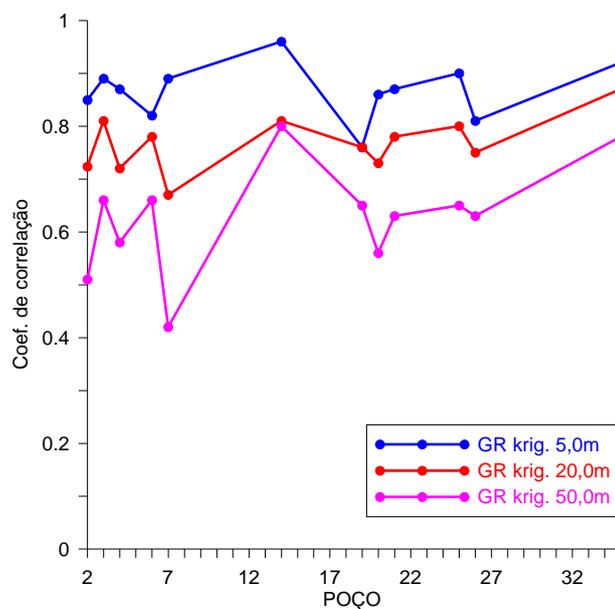


Figura 5 - Coeficiente de correlação entre as curvas GR *krigadas* e a curva GR original, para os 12 poços investigados.

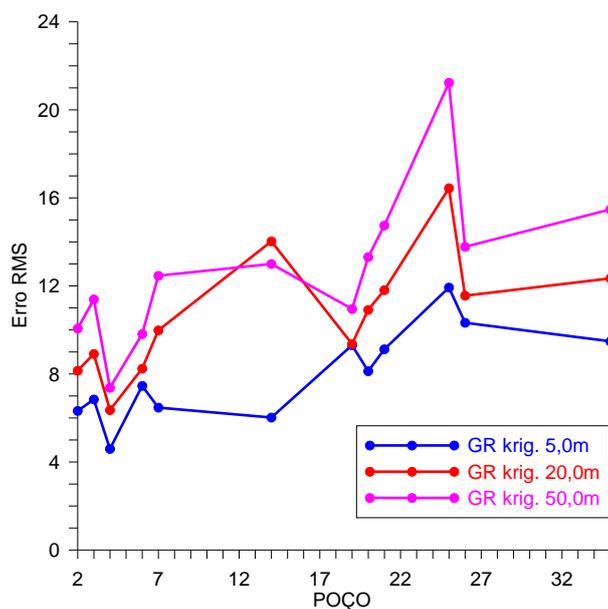


Figura 6 - Erro RMS calculado entre as curvas GR *krigadas* e a curva GR original, para os 12 poços investigados.

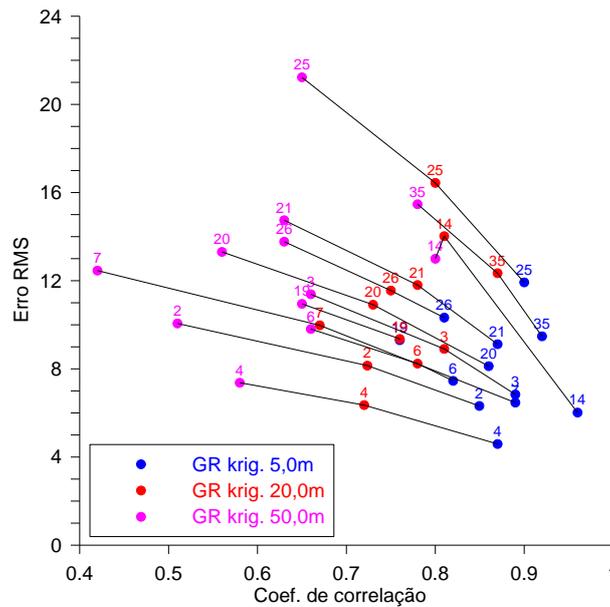


Figura 7 - Relação entre coeficiente de correlação e erro RMS calculados entre as curvas GR *krigadas* (para 3 diferentes distâncias entre pontos de *krigagem*) e a curva GR original, para todos os poços investigados.

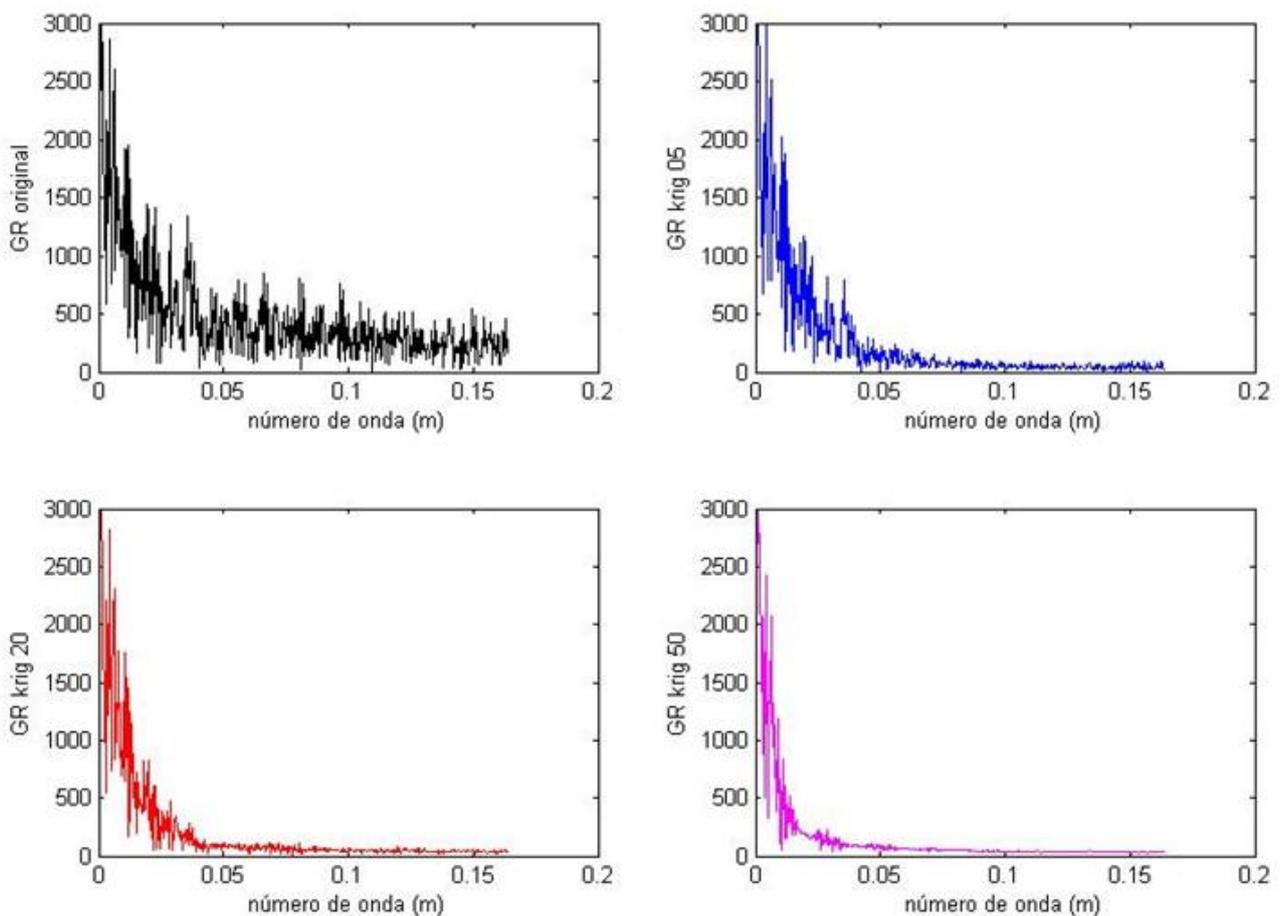


Figura 8 - Distribuição das frequências espaciais, representadas pelo número de onda, das curvas de GR original (curva preta), e das curvas de GR *krigadas* com separações entre os pontos de *krigagem* de 5,0 m (curva azul), 20,0 m (curva vermelha) e 50,0 m (curva rosa) para o poço P35.

CONCLUSÕES

A técnica de *krigagem* ordinária 1D aplicada à curvas de GR de doze poços de um campo terrestre de petróleo se mostrou adequada para a mudança de escala daqueles perfis, conforme indicado pelos indicadores adotados e pela comparação visual entre as curvas *krigadas* e as correspondentes curvas originais.

O alcance médio dos variogramas, para o campo estudado, foi da ordem de dezenas metros, permitindo estimar pontos separados por até esta ordem de grandeza. Os parâmetros de avaliação adotados mostram que a adoção de distâncias crescentes de separação entre pontos *krigados* conduz à obtenção de curvas com escalas de investigação cada vez maiores.

As curvas *krigadas* apresentaram coeficientes de correlação com a curva original de raios gama que variaram entre 0,42 e 0,96. Cerca de 70% dos coeficientes de correlação obtidos, para todos os poços, se encontram no intervalo igual ou superior a 0,7. Para as curvas *krigadas* com distância de 5 m os coeficientes de correlação de todos os poços se encontram acima de 0,7; para as curvas *krigadas* com distância de 20 m apenas um poço apresenta coeficiente de correlação inferior a este limite; e para as curvas *krigadas* com distância de 50 m, apenas dois poços apresentam coeficiente de correlação superior.

O erro RMS para as curvas *krigadas* de todos os poços variou de 4,6 até 21,2 API. Considerando que um intervalo comum para a variação do perfil de raios gama vai de 0 até 120 API, um erro RMS igual a 12 representa um erro médio de apenas 10% da escala. 70% das curvas *krigadas*, para todos os poços, apresentam um erro RMS abaixo de 12 API. Para as curvas *krigadas* com distância de 5 m os erros RMS de todos os poços se encontram abaixo de 12 API; para as curvas *krigadas* com 20 m 3 poços apresentam erro RMS abaixo deste limite; e para as curvas *krigadas* com distância de 50 m, cinco poços apresentam erro RMS inferior a 12 API.

A análise da frequência espacial indicou que as curvas *krigadas* com distância de 5 m apresentam um comprimento de onda mínimo médio de cerca de 90 m; as curvas *krigadas* para 20 m apresentam um comprimento de onda mínimo médio de 150 m; e as curvas *krigadas* com distância de 50 m apresentam um comprimento de onda mínimo médio de 300 m. Este resultado indica claramente o aumento de escala decorrente do aumento da distância entre os pontos *krigados*.

Finalmente, o procedimento adotado neste trabalho pode ser aplicado para qualquer perfil geofísico de poço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PETROBRAS pela gentil cessão dos dados.

REFERÊNCIAS

Dubrule, O. (2003). Geostatistics for Seismic data Integration in Earth Models. Society of Exploration Geophysicists. Tulsa, USA.

Guerra, P.A.G. (1988). Geoestatística Operacional. Departamento Nacional da Produção Mineral.

Hearst, J.R.; Nelson, P.H.; Paillet, F.L. (2000). Well Logging for Physical Properties. John Wiley and Sons, 483 pp.

Hwang, K. (2009). Uncertainty Analysis in Upscaling well log Data by Markov Chain Monte Carlo Method. Thesis submitted to the Texas A&M University, 83 pp.

Journel, A.G.; Huijbregts, C.J. (1978). Mining Geostatistics. Academic Press, 600 pp.

Kitanidis, P.K. (1997). Introduction to Geostatistics – Applications in Hydrogeology. Cambridge University Press.