

Reconciliação dos resultados do planejamento de pilhas de homogeneização auxiliada por simulação geoestatística dos teores de minério

Validating the design of blending piles homogenization system through geostatistical simulation, a case study

Luciana Arnt Abichequer

Engenheira de Minas, Msc,
Departamento de Engenharia de Minas - UFRGS
Professora Assistente - UNIPAMPA
luabichequer@hotmail.com

João Felipe Coimbra Leite Costa

Engenheiro de Minas, MSc, PhD,
Departamento de Engenharia de Minas - UFRGS.
jfelipe@ufrgs.br

Hélder Abel Pásti

Engenheiro de Minas, Msc,
Departamento de Engenharia de Minas - UFRGS.
hapasti@yahoo.com.br

Diego Machado Marques

Engenheiro de Minas, Msc,
Departamento de Engenharia de Minas - UFRGS.
diegommarques@hotmail.com

Jair Carlos Koppe

Geólogo, Engenheiro de Minas, MSc, DSc,
Departamento de Engenharia de Minas - UFRGS.
jkoppe@ufrgs.br

Resumo

As usinas de beneficiamento de minério, para garantir elevados índices de recuperação no produto final, dependem de inúmeros fatores, entre os quais destaca-se a estabilidade no teor de alimentação. As pilhas de homogeneização têm se mostrado uma ferramenta eficaz no atendimento dessa necessidade, atenuando, significativamente, a variabilidade do minério proveniente de diferentes frentes de lavra. Esse estudo testa a eficiência da simulação geoestatística quando aplicada à previsão da variabilidade *in situ* dos teores do minério formador das pilhas de homogeneização. Isto porque os métodos tradicionalmente utilizados, para o planejamento desses sistemas, não são capazes de incorporar, adequadamente, a incerteza associada ao valor estimado. Surge, então, a simulação geoestatística como alternativa, método que possibilita a geração de múltiplos cenários equiprováveis dos teores de determinado depósito. O conjunto de realizações dará origem a um grupo de possíveis valores para os blocos formadores de cada pilha, possibilitando, assim, a quantificação da variabilidade *in situ*. Os teores simulados foram comparados com os amostrados pela empresa. A reconciliação entre previsto e realizado mostrou precisão e acuracidade dos modelos gerados, reproduzindo, adequadamente, os teores de referência.

Palavras-chave: Variabilidade *in situ*, pilhas de homogeneização, simulação geoestatística.

Abstract

Mineral processing in order to ensure high ore recovery at the final product depends on many factors, among them, the low variability in the head grades feeding the plant. For this, homogenization piles have been an effective tool for significantly diminishing variability. This study tests the efficiency of geostatistical simulations to predict in situ grade variability and how this variability is transposed to the ore, forming blending piles. Traditionally, the methods used in designing these systems are not capable of properly incorporating the uncertainty associated with the estimated value. Ordinary kriging, for example, results in best local estimates, but with a

smooth global variance. Conversely, geostatistical simulations provide equiprobable scenarios for the grades of a given deposit. These scenarios honor the sample values, their histogram and spatial distribution. They also provide a set of possible values for each block which forms each homogenization pile. Finally, it is possible to predict the in situ grade variability, given the real grades. The results were compared against the real (reference) mined grades through reconciliation. Results demonstrated that the methodology is accurate and precise enough to be applied in blending piles design.

Keywords: *In situ variability, homogenization pile, geostatistical simulation.*

1. Introdução

As usinas de beneficiamento de minério dependem de inúmeros fatores para garantir a máxima recuperação do produto final e, conseqüentemente, máxima lucratividade possível. Dependem da utilização dos equipamentos e reagentes adequados, das quantidades e concentrações desses reagentes, do grau de cominuição do minério que está sendo alimentado e, principalmente, da estabilidade dos teores de alimentação desse minério.

Garantir a baixa variabilidade nos teores de alimentação da planta é um fator de grande importância no processo, sendo imprescindível que o minério provindo de diferentes frentes de lavra, com teores diferentes, seja propriamente homogeneizado. As pilhas de homogeneização têm se mostrado uma ferramenta muito eficiente no atendimento desse objetivo.

As pilhas do tipo chevron, mais comumente utilizadas na mineração e objeto desse estudo, são formadas por sucessivas camadas de minério sobrepos-

tas, que formam uma espécie de prisma contendo minério de diversas frentes de lavra. A retomada é feita em fatias verticais, sendo que cada uma destas fatias é formada por blocos de lavra de áreas diferentes da mina. O problema deste método é que, devido ao modo como é feita a deposição do material, as partículas mais grossas podem ser segregadas para a base da pilha. A Figura 1 mostra o princípio de funcionamento da pilha tipo chevron utilizada na mineração estudada. Na parte superior da figura, está representada a deposição do material e, na parte inferior, pode ser observado o princípio de funcionamento do equipamento responsável pela retomada do material.

Valente (1982) descreveu, detalhadamente, como funciona o processo de homogeneização nas pilhas tipo chevron.

- Como as pilhas são alimentadas em um sistema de diversos leitos horizontais sobrepostos, a massa de cada leito pode ser representada por um ΔR da massa total R da pilha. Desse modo, a variabilidade do material ROM será

igualmente dividida entre os diversos intervalos de massa ΔR .

- Se a pilha de homogeneização for operada adequadamente, então, devido ao modo de deposição do material, a variabilidade existente entre os diversos ΔR estará sobreposta quando a pilha estiver formada.
- Devido às dimensões do pátio onde serão montadas as pilhas de homogeneização e às dimensões dos blocos de lavra minerados para formar essas pilhas, algumas vezes pode ocorrer a sobreposição de determinada quantidade de material pertencente ao mesmo bloco de lavra em mais de um ΔR . Assim, existirá uma variação dos teores entre as fatias retomadas. Tal variação, porém, será menor do que a existente entre os ΔR .
- O processo de homogeneização em pilhas deve ser estudado em função do número de leitos de deposição de minério, da massa de cada leito (ΔR) e da massa de cada fatia retomada.

Ferreira et. al. (1992) descreveram



Figura 1
Pilha do tipo Chevron: na parte superior é mostrada a deposição do material e, na parte inferior, a retomada.

que o dimensionamento de pátios de homogeneização deve considerar especialmente dois fatores:

- **Processual:** a geometria da pilha e as características do material influenciam diretamente na diminuição do desvio-padrão/variação.
- **Econômico:** o custo das correias transportadoras é diretamente proporcional ao comprimento do pátio de homogeneização, enquanto que o custo de armazenamento e de deposição do material é diretamente proporcional à largura da pilha que se pretende formar.

Muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de aperfeiçoar o dimensionamento de pátios de homogeneização e podem ser encontrados em Gerstel e Werner (2003) e em Marques et al. (2007), entre outros. No entanto, o objetivo maior desse estudo de caso é validar a simulação sequencial gaussiana como opção para medir a variabilidade dos teores médios das pilhas de homogeneização.

Os métodos de estimativa tradicionalmente utilizados, para a construção do modelo de blocos e para o

planejamento dessas pilhas, não são capazes de prever a variabilidade associada à estimativa de teores de maneira efetiva. A krigagem ordinária (Matheron, 1963), por exemplo, gera a melhor estimativa para a média local em um bloco; porém, para se garantir que o erro associado a essa estimativa seja mínimo, a variância entre os teores dos blocos estimados é suavizada. A variabilidade dos teores dos blocos calculada é menor do que a dos dados originais. Assim, essa incerteza associada às estimativas não pode ser corretamente incorporada. A metodologia sugerida, nesse estudo, utiliza a simulação geoestatística como alternativa a ser utilizada no planejamento das pilhas de homogeneização, já que uma das premissas desse método é a reprodução da variabilidade próxima a dos teores que serão minerados.

A simulação geoestatística tem sido amplamente utilizada para o mapeamento da incerteza associada à estimativa dos teores. Avaliar essa incerteza é crucial para o estudo de diferentes aspectos relacionados à exploração mineral. Souza, Costa e Koppe (2004) utilizaram simu-

lação geostatística como uma ferramenta para avaliação de recursos minerais. Koppe, Costa e Koppe (2009) aplicaram o método para auxiliar na melhor escolha de novos locais de amostragem. Já Journel e Alabert (1990) utilizaram uma variação do método, a simulação sequencial dos indicadores, para estudar a continuidade da permeabilidade em reservatórios de petróleo.

Nesse estudo, a variabilidade é medida por meio de múltiplos cenários calculados pelo algoritmo de simulação sequencial gaussiana. Esses cenários, para serem condicionalmente simulados, devem reproduzir os valores das amostras em seus locais de obtenção, o histograma dos dados desagrupados e as mesmas características de distribuição espacial (variogramas). Cada realização irá gerar uma possível média para os teores dos blocos formadores de cada pilha. De posse de inúmeras médias calculadas para as pilhas pela simulação e das médias amostradas na usina, é possível reconciliar o que foi previsto pelo método com o que foi medido, validando, assim, todo o procedimento.

2. Materiais e métodos

A metodologia foi aplicada em uma mina de fosfato da região central do Brasil. Nessa mina, existem duas pilhas de homogeneização, cada uma com capacidade aproximada de 110.000 toneladas. Para verificar a adequabilidade da simulação geoestatística, foram comparadas as médias das pilhas simuladas com as médias amostradas na saída do moinho durante a retomada da pilha, o que, por sua vez, definirá o teor de alimentação da usina.

Um modelo de blocos 3D, para a variável P_2O_5 , foi gerado por meio do algoritmo de simulação sequencial gaussiana (Isaaks, 1990), com a utilização do *software* Isatis®. Esse algoritmo gera múltiplos cenários equiprováveis da distribuição dos teores, reproduzindo a continuidade espacial, o histograma e o valor das amostras em suas posições espaciais. O conjunto de blocos formadores de uma pilha poderá, então, retornar, tantos teores médios, para cada pilha, quantos forem os cenários simulados, dada uma sequência de lavra projetada. Assim, o intervalo de possíveis valores para as médias de cada pilha é simulado, gerando o que se denomina espaço de incerteza.

A obtenção dos teores médios simulados de uma pilha de homogeneização, para que sejam utilizados em um estudo de reconciliação, requer o prévio conhecimento de quais blocos foram lavrados para formar essa pilha. No presente trabalho, as pilhas são formadas por um conjunto de blocos delimitado por sólidos ou *wireframes*, que, por sua vez, estão localizados em diversas frentes de lavra em operação na mina. A Figura 2 mostra uma representação esquemática de um conjunto de *wireframes* e seus histogramas associados com os valores simulados que as pilhas podem assumir. Cada conjunto, formado por blocos de 5x5x5m, recebe uma identificação para diferenciá-lo dos demais que formam outras pilhas. Esse procedimento foi feito com o uso do *software* Datamine Studio®.

Identificados os blocos que fazem parte de cada pilha, estes são exportados para o *software* Isatis®, já que este contém as imagens estocásticas geradas para o depósito. Fazendo uso de ferramentas de seleção de intervalos e de operações de lógica, é possível saber que blocos estão dentro de quais domínios geoestatísticos simulados, já que a

simulação é executada separadamente em cada domínio. Depois disto, os blocos de uma mesma pilha pertencentes a diferentes domínios são agrupados em um único arquivo. Assim, o conjunto de sólidos/*wireframes* de todas as pilhas estará completamente preenchido por blocos com informações sobre o conteúdo simulado da variável P_2O_5 .

O teor médio simulado de cada pilha é obtido, simplesmente, pela média dos teores de todos os blocos que compõem essa pilha. Como não existem ensaios precisos de densidade na mina, embora esse não seja o procedimento mais indicado, um valor médio para este parâmetro tão importante foi assumido como 2,1 t/m³. Então, como todos os blocos têm as mesmas dimensões e a densidade assumida é a mesma, todos eles têm a mesma massa e o teor médio da pilha pode ser calculado por média aritmética.

Cada cenário simulado dá origem a uma média ligeiramente diferente para cada uma das 50 pilhas estudadas. Como foram gerados 100 cenários equiprováveis, então foram calculados 100 possíveis e equiprováveis teores médios de P_2O_5 para cada pilha de homogenei-

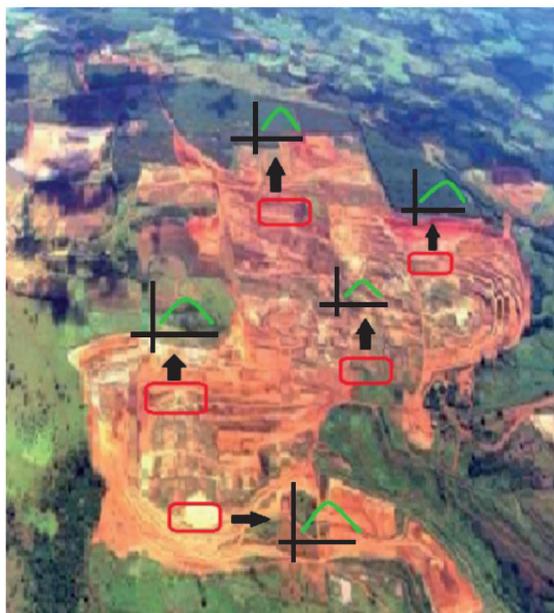


Figura 2
Vista geral da cava, evidenciando as bancadas (*wireframes*) das quais são extraídos os blocos (cada um com seu respectivo teor) que formam uma pilha de homogeneização.

zação. A Figura 3 mostra 100 médias calculadas para uma das 50 pilhas, escolhida aleatoriamente.

O grupo de teores médios simulados para todas as pilhas é, então, exportado para o programa Microsoft Excel® e reproduzido em forma de gráfico (Figura 6). É possível perceber que o intervalo de médias das pilhas gerado pela simulação não é uniforme, ou seja, para algumas pilhas ele é mais estreito, abrangendo uma faixa menor de valores possíveis,

e, para outras, o efeito contrário pode ser observado. O que acontece é que a incerteza sobre os teores dos blocos de regiões onde a variabilidade é maior, ou onde a malha amostral for menos densa, também é maior, já que, quanto menos informação se tiver sobre determinado local, mais imprecisa será a estimativa nesse lugar.

A comparação entre os valores simulados e os valores amostrados foi feita com as amostras coletadas na sa-

ída do moinho SMR, sendo que, na entrada do moinho, há um descarte de partículas grossas de, aproximadamente, 10% do material. Esse foi o procedimento adotado, visto que não existe um amostrador na correia alimentadora do sistema de homogeneização. Essas amostras são coletadas três vezes ao dia. Desses valores amostrados origina-se a média amostrada final da pilha, utilizada para efeitos de reconciliação nesse estudo.

Distribuição dos valores simulados para uma pilha selecionada aleatoriamente

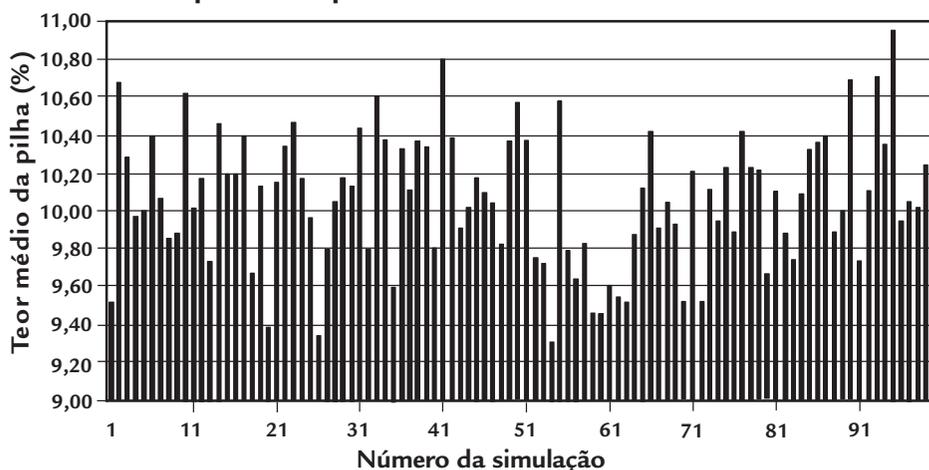


Figura 3
Distribuição dos teores médios de uma pilha de homogeneização escolhida aleatoriamente, entre as 50 formadas, para a variável P_2O_5 simulada.

3. Resultados e discussão

O modelo de blocos simulado deve ser validado antes de sua utilização na construção das pilhas de homogeneização. Essa validação consiste na reprodução do histograma, dos valores simulados nos locais amostrados e da reprodução do variograma dos teores. A Figura 4 mostra quatro histogramas

simulados e o histograma dos dados originais. É possível verificar a semelhança do histograma dos dados originais com os simulados.

Para que um cenário simulado represente, de maneira adequada, o cenário real, a continuidade espacial das variáveis, naturalmente existente em um

depósito mineral, deve ser respeitada, ou seja, as direções de anisotropia, com os mesmos parâmetros para os variogramas experimentais e modelados, devem ser mantidas. Como citado anteriormente, o método é capaz de gerar inúmeros e equiprováveis cenários condicionalmente simulados para um depósito mineral.

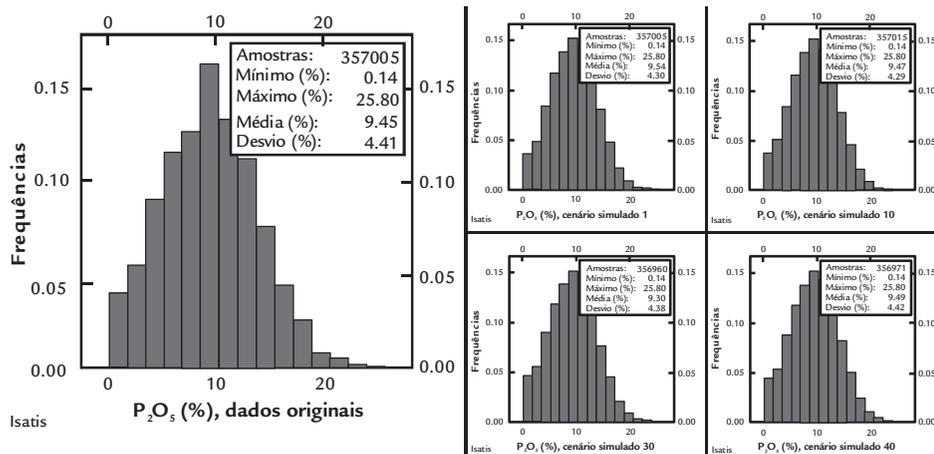


Figura 4 Histograma dos dados originais e histogramas de quatro realizações do modelo de blocos simulado.

No entanto, apesar de estes serem semelhantes, logicamente, não são iguais. Assim, mesmo que as características de continuidade espacial sejam mantidas, os parâmetros dos variogramas simulados podem e devem flutuar em torno do variograma experimental dos dados originais. São as flutuações ergódicas que estão reproduzidas na Figura 5, para um dos domínios geostatísticos do depósito.

Validado o modelo simulado, os blocos que compõem as pilhas devem ser selecionados. Cada pilha é formada por um volume *in situ* (*wireframes*), sendo que cada uma destas *wireframes* representa um ou mais blocos extraídos de diferentes frentes de lavra em operação. Nesse estudo, foram ana-

lisadas 50 pilhas, formadas ao longo de 8 meses no ano de 2007. Foram gerados, pelo algoritmo de simulação sequencial gaussiana, 100 possíveis cenários de teores para os blocos que formam o depósito. Então, cada conjunto de *wireframes* que dá origem a uma única pilha retorna 100 diferentes médias para a variável P_2O_5 simulada. Assim, devido à incerteza associada ao valor estimado de cada bloco, a variabilidade associada ao teor médio de cada pilha pode ser incorporada.

Os valores das médias simuladas podem ser confrontados com os das amostras coletadas. A Figura 6 mostra 50 valores amostrados de P_2O_5 , ao longo de 8 meses em 2007. Também

mostra 100 equiprováveis médias calculadas para o grupo de blocos formadores de cada pilha, sendo os limites inferiores e superiores correspondentes ao menor e maior valor médio simulado, respectivamente. É possível observar que, em 92% do total das pilhas analisadas, o espaço de incerteza previsto pelo método proposto inclui o valor amostrado, ou seja, a metodologia aplicada se mostrou eficiente para analisar o risco associado à previsão de teores dos blocos que formarão as pilhas de homogeneização.

É importante salientar que, na Figura 6, de maneira geral, os valores amostrados podem ser observados na área compreendida pelos mais altos va-

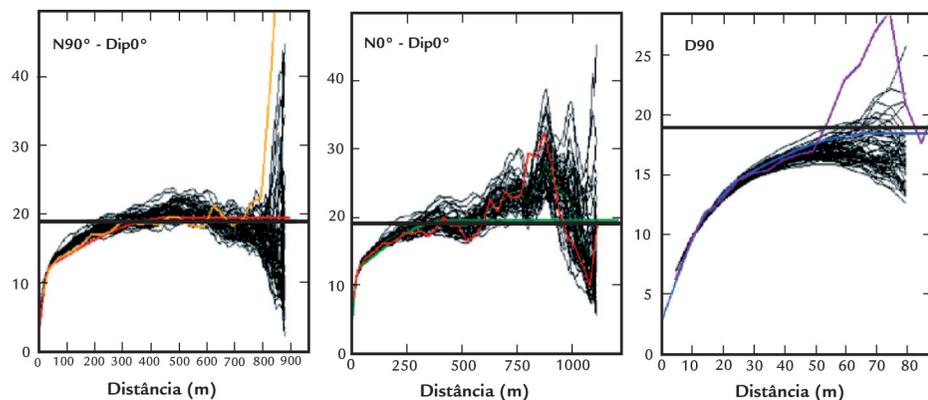


Figura 5 Reprodução dos variogramas e flutuações ergódicas nas principais direções de anisotropia para a variável P_2O_5 , em um dos domínios geostatísticos do depósito.

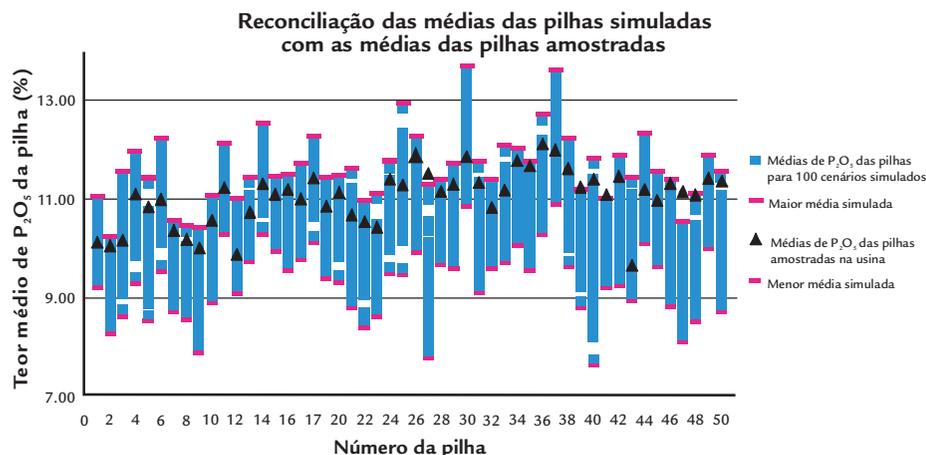


Figura 6 Cinquenta pilhas formadas ao longo de 2007. Os triângulos representam as médias amostradas no moinho SMR. Os quadrados azuis são as médias calculadas para as pilhas em 100 cenários simulados. As linhas vermelhas são os intervalos inferiores e superiores, representados pelo menor e pelo maior valor da média simulada para cada pilha.

lores das médias simuladas. Isto, provavelmente, acontece, porque esse depósito de fosfato é de origem ígnea, assim o enriquecimento do fosfato é causado por ações do intemperismo, sendo as

tipologias oxidadas as mais ricas em P_2O_5 . Como as amostras são coletadas na saída do moinho SMR e na entrada do mesmo, há um descarte de partículas grossas de, aproximadamente, 10%,

sendo que essas partículas grossas são menos enriquecidas e o teor amostrado no SMR é um pouco maior do que o que realmente foi minerado.

4. Conclusões

A quantificação da variabilidade associada aos sistemas de homogeneização de minério é de extrema importância, visto que tal quantificação influi, diretamente, na recuperação do produto final das usinas de beneficiamento de minérios e, conseqüentemente, na lucratividade.

Os métodos de estimativa utilizados regularmente não são capazes de prever essa variabilidade de maneira adequada. Assim, a incerteza associada ao

processo de previsão de teores não pode ser corretamente incorporada.

A simulação geoestatística, representada nesse estudo pela simulação condicional sequencial gaussiana, tem se mostrado muito eficiente na previsão da variabilidade de teores *in situ*, visto que uma das premissas do método é a reprodução da variabilidade natural do depósito.

Os valores das médias amostradas foram comparados com o espaço

de incerteza mapeado pela metodologia proposta. Na comparação das médias amostradas com o espaço de incerteza representado pelo grupo de médias simuladas, em 92% das vezes o espaço mapeado incorporou os valores amostrados.

Assim, a metodologia proposta por esse estudo se mostrou uma ferramenta bastante eficiente para ser aplicada na previsão da variabilidade de teores *in situ* e no planejamento de pilhas de homogeneização.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Datamine Latin America e ao CNPq

pelo suporte financeiro. À Fosfértil S.A. pelo banco de dados e visitas de campo.

6. Referências bibliográficas

- FERREIRA, F. M. *Otimização do projeto de pátios de homogeneização através do método da simulação condicional*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1989. 114p. (Dissertação de Mestrado).
- GERSTEL, A. W., WERNER, J. W. Computer simulation program for blending piles. *Bulk Solids Handling*, v. 16, n. 1, p. 49-58, 1996.
- ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, M. R. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, 1989.
- ISAAKS, E. H. *The application of Monte Carlo Methods to the analysis of spatially correlated data*. USA: Stanford University, 1990. (PhD Thesis).
- JOURNAL, A. G., ALABERT, F. G., STANFORD U. New method for reservoir mapping. *Journal of Petroleum Technology*. v. 42, n. 2, 1990. Society of Petroleum Engineers.
- KOPPE, V. C., COSTA, J. F. C. L., KOPPE, J. C. Algorithm to help additional drilling location. of In: APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY - APCOM2009. *Proceedings...* Canada, Vancouver: The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2009. (CD-ROM).
- MARQUES, D. M., COSTA, J. F. C. L., KOPPE, J. C., COSTA, M. S. A., BATISTON, E. L., PILGER, G. G., RIBEIRO, D. T. Incorporating in situ grade variability into blending piles design using geostatistical simulation. In: THIRD WORLD CONFERENCE ON SAMPLING AND BLENDING, *Proceedings...* 2007. p. 378-389.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p. 1246-1266, 1963.
- VALENTE, J. M. G. P. Geomatemática - Lições de Geoestatística. Ouro Preto: Fundação Gorceix, v. 6, 1982. 323p.
- SOUZA, L. E., COSTA, J. F. C. L., KOPPE, J. C. Uncertainty estimate in resources assessment: a geostatistical contribution. *Natural Resources Research*, v. 13, p. 1-5, 2004.

Artigo recebido em 29 de janeiro de 2010. Aprovado em 14 de fevereiro de 2012.