

Comparação do processamento de dados geoquímicos de ouro em solo via krigagem da indicatriz e simulação indicatriz sequencial visando a definição de áreas prioritárias na etapa de *follow-up*: o caso dos prospectos Rosa de Maio e 12 de Outubro, Tapajós

Thais Andressa Carrino¹
Adalene Moreira Silva¹
Nilson Francisquini Botelho¹
Sérgio Sacani Sancevero²
Marcelo Pinto³
Luiz Carlos Pinheiro Clerot³

¹ Instituto de Geociências – Universidade de Brasília
70910-900 – Brasília-DF, Brasil
thais.carrino@gmail.com; {adalene, nilson}@unb.br

² ROXAR
Rua Costa, 31, ap-20, 01304010, São Paulo-SP, Brasil
sacani@gmail.com

³ MAPEX Mineração, Importação e Exportação Ltda.
Av. Constantino Nery, 2552, Manaus-AM
marcelopinto@mapex.com.br; lclerot@yahoo.com.br

Abstract. This paper comprises a study about the use of the two methods of geostatistics for generation of maps of gold in soil in the Rosa de Maio and 12 de Outubro prospects, located in the Tapajós Mineral Province (Brazilian Amazon region). The indicator kriging (IK) and sequential indicator simulation (SIS) were selected for production of the above mentioned maps and the statistics of the original data and images were compared. The results related to the application of SIS were most consistent because the image of mean of 500 simulations conserves the statistics of the sample data in both case studies. The SIS images were integrated with airborne geophysics and geologic interpretation were done.

Palavras-chave: krigagem da indicatriz, simulação indicatriz sequencial, integração de dados, indicator kriging, sequential indicator simulation, data integration.

1. Introdução

A aquisição de dados geoquímicos equivale a uma das etapas iniciais de *follow-up* em um projeto de mineração. Estes dados devem ser processados com cautela para prover informações seguras focando, sempre que possível, a manutenção dos dados originais para a reprodução mais realista da informação estudada (litologia, geoquímica, teor etc). Métodos geoestatísticos, tais como as técnicas de estimativas pontuais e as estocásticas, possuem um papel relevante para aplicações em dados geoquímicos, a fim da integração com outros tipos de informações também adquiridas num estágio inicial de pesquisa mineral, como imagens de sensoriamento remoto e dados geofísicos.

Este artigo foca o tratamento de dados geoquímicos de ouro em solo obtido pela empresa Mapex Ltda. nas regiões dos prospectos 12 de Outubro e Rosa de Maio, localizados na maior província aurífera do Brasil, a Província Mineral do Tapajós (Figura 1), através de um estudo comparativo da aplicação da krigagem da indicatriz e da simulação indicatriz sequencial processadas no *software* livre SGeMS 2.0 (Remy, 2007). Estas duas áreas são caracterizadas por rochas hospedeiras de ouro associadas a vulcânicas ácidas (riolitos brechados, silicificados pertencentes ao Grupo Iriri; ~1,8 Ga) e a granitos da Suíte Intrusiva Parauari (~1,8 Ga). A gênese destas mineralizações

auríferas ainda não foi totalmente estabelecida, assim como na maior parte desta província.

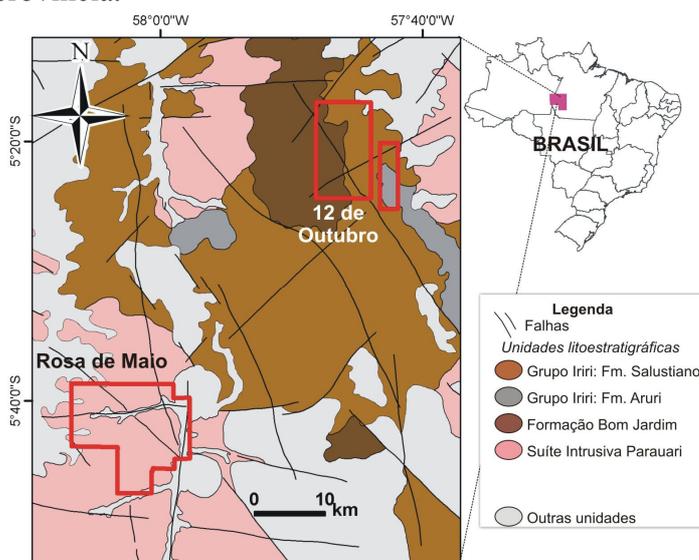


Figura 1. Localização dos prospectos 12 de Outubro e Rosa de Maio na Província Mineral do Tapajós e mapa geológico simplificado (modificado de Klein et al., 2001).

2. Materiais

Com relação ao Prospecto 12 de Outubro, a malha geoquímica de ouro em solo consta de 680 amostras coletadas seguindo-se uma amostragem N-S aproximadamente a cada 50 m, sendo na parte central reduzida a cerca de 25 m. A amostragem E-W foi realizada a cada 200 m em geral e, na porção central, variável entre 50 m e 25 m. Para a geração dos *grids*, optou-se, portanto, pelo emprego de células de 25 m.

No caso do Prospecto Rosa de Maio, 7323 amostragens de ouro em solo foram cedidas. Com exceção da porção central, onde maiores teores são encontrados (denominada de prospectos Buriti e Centro-norte), a amostragem N-S foi espaçada em torno de 50 m e a E-W em 400 m. Na parte central, a malha foi mais adensada, consistindo na amostragem N-S a cada 25 m e na direção E-W a entre 100 m e 200 m. Para esta situação, optou-se pela geração de *grids* caracterizados por células de 50 m.

3. Métodos

Dois métodos geoestatísticos foram selecionados: a krigagem da indicatriz e a simulação indicatriz sequencial, ambas utilizando-se da mesma variável indicatriz, ou seja, uma variável binária regionalizada (zero e um). Essa variável indicatriz foi obtida por meio da transformação das variáveis contínuas de ouro em solo associadas aos dois prospectos. Para tais estudos de caso, esta transformação é expressa pela Eq. 1:

$$I(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{se } x_i \geq 50 \text{ ppb} \\ 0, & \text{se } x_i < 50 \text{ ppb}, \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde $I(x_i)$ é a variável indicatriz ouro em solo e o corte de 50 ppb é considerado prospectivo nas ambiências abordadas.

De posse dessa variável, procedeu-se à etapa de análise exploratória dos dados, abrangendo a geração do mapa base, a análise de histograma e o estudo variográfico (Figuras 2 e 3). Para o Prospecto 12 de Outubro, o variograma experimental foi produzido com base na direção de maior variabilidade (245 Az.) e usando tolerância angular de 30°. A modelagem do variograma experimental envolveu a seleção de duas estruturas baseadas no modelo esférico, além do emprego do efeito pepita. Os detalhes dos parâmetros utilizados estão apresentados na Figura 2. Para o Prospecto Rosa de

Maio, determinou-se um variograma experimental orientado na direção do azimute 320 (tolerância angular de 30°), considerando-se 30 passos de 250 metros, enquanto que a modelagem deste variograma experimental caracterizou-se pela estipulação de duas estruturas de modelo esférico, além do efeito pepita. Maiores informações sobre os parâmetros utilizados encontram-se Figura 3. A segunda etapa equivaliu à aplicação dos métodos da krigagem e da simulação estocástica, empregando-se os dados de modelagem dos respectivos variogramas a cada área de estudo.

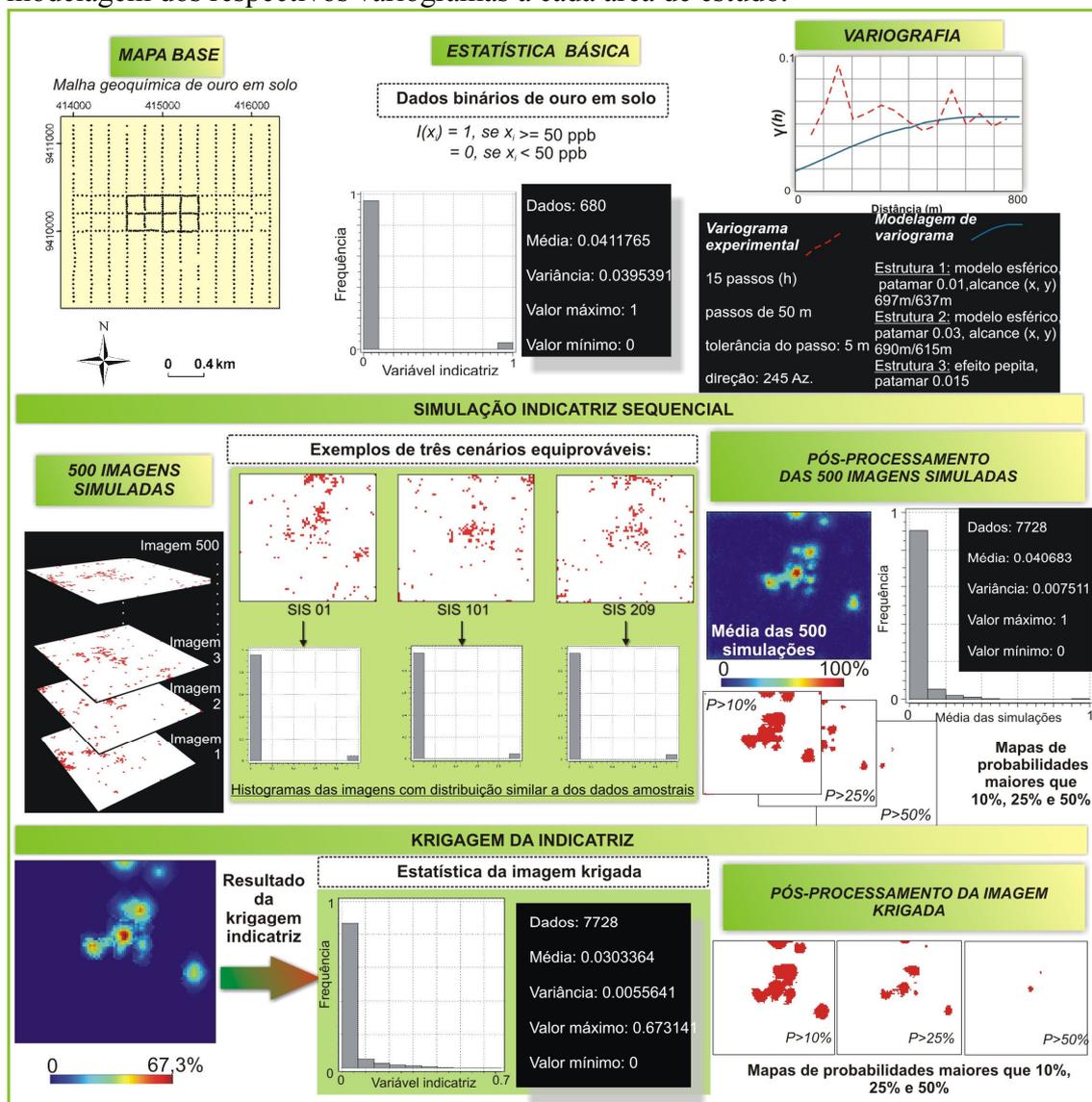


Figura 2. Resumo das etapas de análise exploratória de dados de ouro em solo do Prospecto 12 de Outubro e da aplicação das técnicas krigagem da indicatriz e simulação indicatriz sequencial.

3.1. A krigagem da indicatriz

A krigagem da indicatriz (KI) (Journel, 1984) é caracterizada por ser não paramétrica, ou seja, não considera nenhum tipo de distribuição de probabilidade *a priori* para a variável aleatória, diferentemente de modelos gaussianos, por exemplo. Compreende um método geoestatístico que se utiliza da posição de valores dos dados para gerar uma distribuição local em vez de uma distribuição global das propriedades analisadas (Goovaerts, 1997). Esta técnica estima a probabilidade de ocorrência de variáveis discretas. Destaca-se que o emprego deste tipo de krigagem serve para

produzir a previsão de valores sobre uma superfície e, sobretudo, para gerar modelos de incertezas locais para dados geográficos que compartilham uma base de informações (Felgueiras et al., 2002).

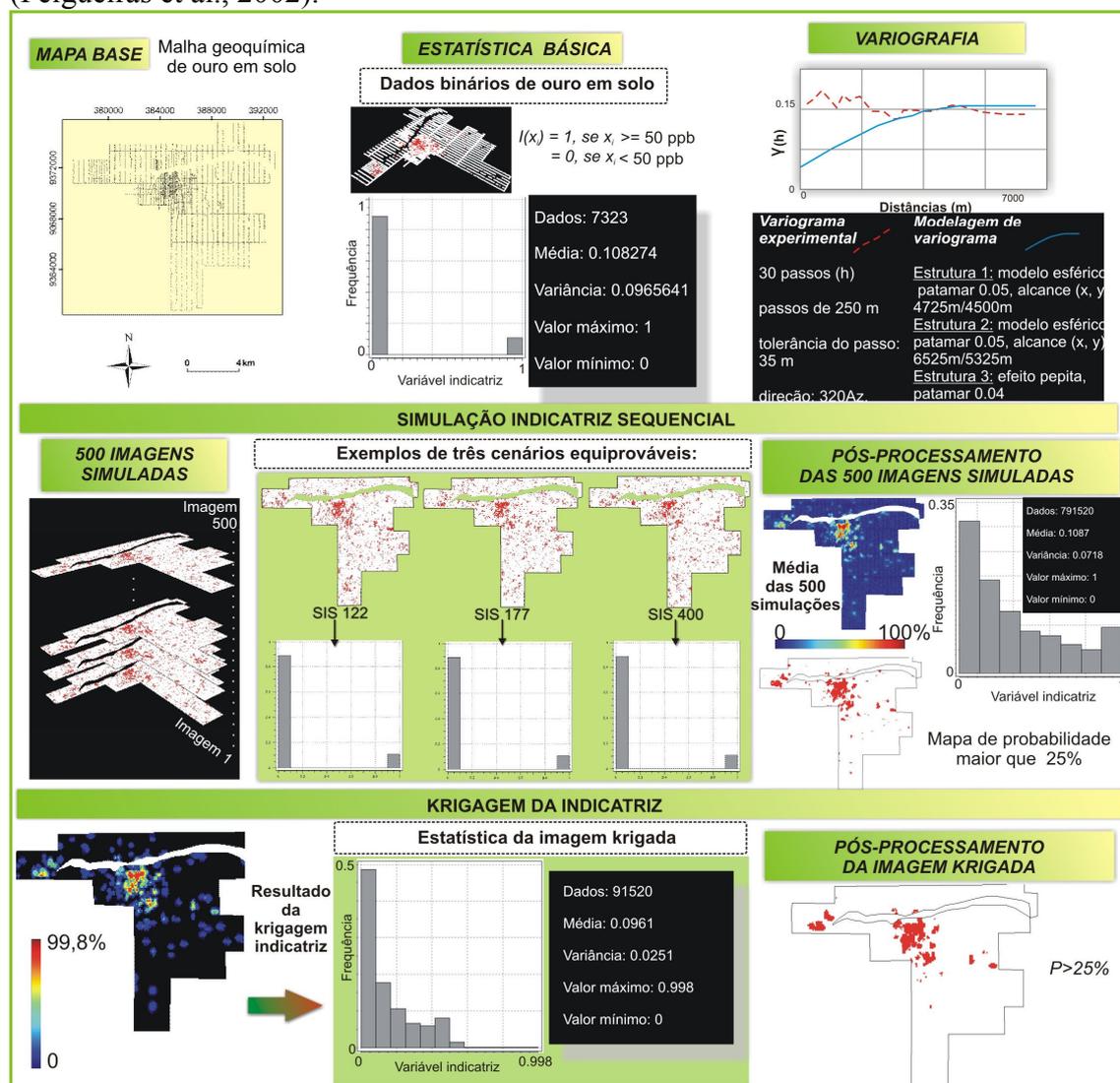


Figura 3. Resumo das etapas de análise exploratória de dados de ouro em solo do Prospecto Rosa de Maio e aplicação das técnicas krigagem da indicatriz e simulação indicatriz sequencial.

A partir do mapa da variável indicatriz krigado é possível determinar cortes de probabilidades para as anomalias de ouro em solo, a fim de comparações de resultados e de áreas mais anômalas para a prospecção, procedimento incluso na análise de incerteza. Para tal, são determinados os níveis de corte a partir dos quais serão obtidos os mapas de probabilidade de ocorrência; nos estudos de caso deste artigo, os cortes estabelecidos consistem em > 10%, 25% e 50%.

3.2. A simulação indicatriz sequencial

Os métodos de krigagem geram estimativas pontuais, ou seja, independentemente das estimativas vizinhas, compreendendo a melhor estimativa local associada a uma variância de erro mínima possível. O mapa, entretanto, pode não ser o melhor como um todo, visto que a técnica tende a suavizar dados, observando-se, tipicamente, as seguintes situações: baixos valores amostrais tendem a ser superestimados e os altos

valores subestimados. Isto é uma problemática quando o objetivo compreende a verificação de padrões de valores extremos, como anomalias auríferas, por exemplo. Além disso, a suavização não é uniforme e é dependente da configuração dos dados. Objetivando-se um produto mais eficiente para a questão, aparecem as simulações estocásticas, que se valem da geração de L realizações (ou simulações) $z(l)(u)$, $l=1, \dots, L$ para células u (Goovaerts, 1997).

As simulações estocásticas foram idealizadas para a reprodução da variabilidade da variável regionalizada em estudo de maneira probabilística. A medida da incerteza espacial dos valores amostrados é feita de forma conjunta e não individual como na krigagem (Goovaerts, 1997). O objetivo da aplicação destas simulações compreende a reprodução da textura geológica (características globais) a partir da produção de modelos ilimitados (L realizações), onde cada um é uma representação da realidade, fato que permite obter a incerteza de forma mais realística acerca das heterogeneidades da variável. Desta maneira, geram-se imagens equiprováveis mesma média, histograma e variabilidade espacial próximos aos dos valores experimentais (Goovaerts, 1997).

Dentre os grupos de simulações destacam-se as sequenciais que, em suma, baseiam-se na extensão do condicionamento a toda a informação existente na vizinhança do ponto a simular e que é fornecida tanto pelos valores amostrados da variável quanto pelos valores simulados anteriormente. A simulação indicatriz sequencial (SIS) compreende a técnica não-gaussiana mais comumente utilizada. A produção da variável indicatriz, do variograma experimental e modelado é feita da mesma forma que se realiza quando da aplicação da krigagem da indicatriz. A análise dos resultados das L simulações somente é realizada com o pós-processamento a fim de verificar somente um resultado, a exemplo do cálculo da média e de cortes de probabilidade. Estes dois pós-processamentos foram empregados no estudo dos prospectos 12 de Outubro e Rosa de Maio, considerando-se a produção de 500 imagens simuladas (L).

4. Resultados e discussões

Com relação ao uso da KI (Figuras 2 e 3), nota-se que a estatística das imagens geradas, em relação à dos dados amostrais, são subestimadas, ou seja, valores de máximo, variância e média das imagens produzidas pela krigagem são inferiores aos dos dados originais. Este efeito de suavização dos dados é uma característica inerente ao processamento de dados via krigagens, e afeta a compreensão dos valores geoquímicos anômalos em um programa de exploração mineral.

Já as simulações estocásticas são interessantes principalmente pelo fato de evitar a suavização extrema dos dados originais. No estudo dos dois prospectos abordados, as 500 imagens geradas são caracterizadas por estatística básica a mais próxima possível dos dados amostrais sendo, porém, visualmente diferenciadas (Figuras 2 e 3). Exemplos podem ser vistos na Figura 2, a partir de três cenários equiprováveis designados como SIS01, SIS101 e SIS209 referentes ao Prospecto 12 de Outubro, e na Figura 3, abrangendo o prospecto Rosa de Maio, por meio das imagens SIS122, SIS177 e SIS400. Todos estes exemplos são caracterizados pelo mesmo formato dos histogramas que, por sua vez, são similares aos dos respectivos dados amostrais. Isto demonstra que a SIS permite melhor manutenção dos dados amostrais frente à técnica da KI. Desta forma, os produtos gerados pela SIS a ambos os prospectos foram selecionados para integração com dados de campo e aerogeofísicos disponíveis.

4.1. Prospecto 12 de Outubro

Analisando a imagem da média das 500 imagens simuladas referente ao Prospecto 12 de Outubro, nota-se que esta se caracteriza por manter as heterogeneidades dos dados

amostrais, ao invés das grandes regiões anômalas de ouro com o formato semi-circular típico que as krigagens geram (Figura 2). A análise estatística da imagem da média das 500 simulações evidencia uma diminuição da variância (0,0075) em relação aos dados amostrais, e a manutenção do valor mais anômalo como sendo 1, honrando os dados originais. Desta forma, a imagem da média das simulações indica a variação entre 0% e 100% da probabilidade de ocorrência de anomalias de ouro maiores que 50 ppb.

Cortes de probabilidades maiores que 10%, 25% e 50% também foram realizados a partir da imagem da média das 500 simulações, objetivando a averiguação de áreas mais anômalas, conforme apresentado em detalhe na Figura 4. Observa-se, que as maiores anomalias de ouro em solo estão relacionadas com baixos gradientes magnéticos de direção ENE-WSW analisados nas imagens dos gradientes horizontais medidos nas direções x e y (GX e GY), e com as ocorrências de ouro mapeadas em campo (pits). Estas feições ENE-WSW devem representar um sistema de fraturas ou falhas rúpteis associado com o contexto das mineralizações de ouro. Por tal, constituem uma importante zona de influência metalogenética para a prospecção aurífera nesta região (Klein et al., 2001). Destaca-se que os dados aeromagnetométricos gradiométricos foram cedidos pela empresa Mapex e são caracterizados por alta densidade de amostragem (linhas de vôo de 100 m e de controle de 2300 m). Maiores informações sobre o processamento dos mesmos podem ser obtidas em Carrino (2010).

Na Figura 4 ainda é possível observar que a região anômala e prioritária à prospecção está associada à presença de alteração hidrotermal do tipo silicificação (*stockworks*) e brechas hidrotermais em riolitos pertencentes ao Grupo Iriri. Esta região é caracterizada, nas imagens aerogamaespectrométricas de K, eTh e eU, por altos valores nestes três radioelementos, sendo, por vezes, obliterada pelos espessos perfis de solos presentes na região (valores de alto eTh).

4.2. Prospecto Rosa de Maio

Com relação aos dados amostrais, a imagem da média das 500 simulações apresentou redução da variância (0,0718) e manutenção do valor anômalo (1), além de manter as heterogeneidades dos dados originais em relação à imagem da KI, marcada por anomalias semi-circulares expressivas (Figura 3).

É possível observar, com base na Figura 4, que as anomalias de ouro em solo, mostradas na imagem de corte de probabilidade da variável indicatriz ouro em solo $I(x_i)$ maior que 25%, estão relacionadas com a proximidade espacial de diques máficos, bem definidos nas imagens dos gradientes medidos GX e GY, e também nas imagens de K, eTh e eU em RGB. Estas imagens geofísicas são referentes ao aerolevantamento de 2006 adquirido pela empresa Mapex, marcado por alta densidade de amostragem (linhas de vôo de 75 m e de controle de 750 m). Maiores informações sobre o processamento destes dados aerogeofísicos são encontradas em Carrino (2010).

Dois regiões altamente prospectivas apresentam-se bem definidas nos produtos integrados mostrados na Figura 4:

- *a região do prospecto Sela*, localizada na porção oeste, e associada a diques máficos segmentados por falhas E-W, caracterizadas por movimentação sinistral;
- *a região dos prospectos Centro-norte e Buriti*, localizada na parte central do Rosa de Maio, consistindo no setor mais anômalo que também se apresenta espacialmente associado com diques máficos segmentados por falhas sinistrais.

A contemporaneidade destes diques máficos com as mineralizações de ouro paleoproterozóicas ainda não se encontra totalmente estabelecida. Aparentemente, mais de um enxame de diques ocorre na região do Prospecto Rosa de Maio, visto pelo truncamento de diques NEN-SWS com o de direção próxima a E-W na imagem do

gradiente medido GY. Santos et al. (2002) dataram badeleíta proveniente de dique máfico pelo método U-Pb numa localidade mais ao sul e próxima ao rio Tapajós, obtendo a idade aproximada de 510 Ma. Se confirmada a mesma idade aos diques da região em apreço, estes podem ter tido um papel relevante em uma possível remobilização de ouro paleoproterozóico, explicando-se a íntima associação espacial destes com as anomalias de ouro em solo. Neste possível contexto, as falhas E-W, que podem estar relacionadas com a origem do ouro, podem ter sido reativadas num evento pós-intrusão fissural de magma máfico.

5. Conclusões

Neste trabalho fica evidente que o uso de simulação estocástica, exemplificada pelo emprego da SIS, compreende uma poderosa ferramenta ainda pouco utilizada na produção de mapas geoquímicos de interesse à prospecção mineral. Com base na aplicação da SIS, foi possível: **(a)** preservar os valores geoquímicos amostrais, o que não é observado em relação à aplicação de métodos suavizadores, como as krigagens, e **(b)** analisar zonas anômalas, incluindo-se a geração de mapas de cortes de probabilidade para avaliar a incerteza dos produtos gerados.

Essas duas características principais permitem o refinamento da interpretação geológica nas etapas iniciais de um projeto de mineração, assinalando-se áreas potenciais que guiem trabalhos futuros em escala local, conjuntamente com a integração de outros dados (e.g., geofísicos – Figura 4). Destaca-se, entretanto, que o maior desafio no emprego de simulações estocásticas como a SIS equivale à necessidade de maior demanda computacional e, assim, maior tempo de processamento dos dados.

Agradecimentos

Agradecemos à UnB pelo suporte técnico, ao CNPq pelo projeto CT-Mineral (nº. 555063/2006-2) e à CAPES pela bolsa de mestrado. A.M. Silva e N.F. Botelho agradecem ao CNPq pelas respectivas bolsas de produtividade em pesquisa.

Referências bibliográficas

- Carrino, T.A. Geotecnologias aplicadas ao reconhecimento de áreas chaves à exploração aurífera na Província Mineral do Tapajós. Dissertação de mestrado em Geologia, Universidade de Brasília, DF-Brasília, 192 p., 2010.
- Felgueiras, C.A.; Druck, S.; Monteiro A.M.V. Análise espacial de superfícies: o enfoque da geoestatística por indicação. Ministério da Ciência e Tecnologia/INPE, 25 p., 2002
- Goovaerts, P. Geostatistics for natural resources evaluation. London, Oxford University Press, 483 p., 1997.
- Journel, A.G. The Place of Non-parametric geostatistics. In: G. Verly et al. (Ed.). Geostatistics for Natural Resources Characterization, Part I. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 307-335, 1984.
- Klein E.L., Almeida M.E., Vasquez M.L., Bahia R.B.C., Santos M.L.E., Ferreira A.L. Geologia e recursos minerais da Província Mineral do Tapajós. Folhas Vila Mamães Anã (SB.21-V-D), Jacareacanga (SB.21-Y-B), Caracol (SB.21-X-X), Vila Riozinho (SB.21-Z-A) e Rio Novo (SB.21-Z-C). Estados do Pará e Amazonas. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001, 81 p., 2001.
- Remy, N. SgeMS – Stanford Geostatistical Modeling Software v.2.0. 2007.
- Santos, J.O.S.; Hartmann, L.A.; McNaughton, N.J.; Fletcher, I.R.. Timing of mafic magmatism in the Tapajós Province (Brazil) and implications for the evolution of the Amazon Craton: evidence from baddeleyite and zircon U-Pb SHRIMP geochronology. Journal of South American Earth Sciences, vol. 15, 409-429, 2002.

