

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Departamento de Engenharia de Minas**  
**Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais**

Acácio Nunes de Pina Neto

**ESTIMATIVA DE INCERTEZA E OTIMIZAÇÃO DA MALHA DE SONDAGEM  
POR SIMULAÇÃO CONDICIONAL EM UM DEPÓSITO DE BAUXITA DO  
DISTRITO DE PARAGOMINAS, PARÁ-BRASIL**

Belo Horizonte

2023

Acácio Nunes de Pina Neto

**ESTIMATIVA DE INCERTEZA E OTIMIZAÇÃO DA MALHA DE SONDADEM  
POR SIMULAÇÃO CONDICIONAL EM UM DEPÓSITO DE BAUXITA DO  
DISTRITO DE PARAGOMINAS, PARÁ-BRASIL**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Recursos Minerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Alves Campos

Belo Horizonte

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

UFMG

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

## ATA DA DEFESA DE ARTIGO DO ALUNO ACÁCIO NUNES DE PINA NETO

Realizou-se, no dia 7 de julho de 2023, às 10:00 horas, na plataforma MS MEET da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa do Artigo intitulado "**ESTIMATIVA DE INCERTEZA E OTIMIZAÇÃO DA MALHA DE SONDAÇÃO POR SIMULAÇÃO CONDICIONAL EM UM DEPÓSITO DE BAUXITA DO DISTRITO DE PARAGOMINAS, PARÁ-BRASIL**", apresentado por ACÁCIO NUNES DE PINA NETO, número de registro 2021697058, graduado em GEOLOGIA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS, à seguinte Comissão Examinadora: Professor Pedro Henrique Alves Campos - Orientador, Professor Alizeibek Saleimen Nader (Universidade Federal de Minas Gerais), Eng<sup>a</sup> de Minas – Sílvia Lêda Torres de Farias (Hydro).

A comissão considerou a defesa do artigo:

Aprovada

Reprovada

Nota: **95**

Finalizando os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 7 de julho de 2023.

  
Professor Pedro Henrique Alves Campos (Doutor)

  
Risia Magriotis Pagini  
Coordenadora do Curso de Especialização  
em Engenharia de Recursos Minerais

  
Professor Alizeibek Saleimen Nader (Doutor)

  
Aurea Domingos  
Secretaria do Curso de Especialização  
em Engenharia de Recursos Minerais

  
Eng<sup>a</sup> de Minas – Sílvia Lêda Torres de Farias (Mestre)

## RESUMO

Erros ou incertezas associadas às estimativas de recursos minerais podem comprometer decisões estratégicas de planejamento e de beneficiamento mineral ou até mesmo inviabilizar um empreendimento mineiro. Nesse sentido, visando avaliar o grau de incerteza e a quantificação dos riscos associados as diferentes malhas de sondagem utilizou-se a metodologia DHSA (Drill Hole Spacing Analysis), com uso de simulação condicional por Turning Bands Simulation (TBS) com implementação no programa Isatis.neo Mining Edition®. A partir de múltiplos cenários equiprováveis, foi analisada a incerteza associada às estimativas de sílica reativa (SIRE) para a zona mineralizada (Bauxita Cristalizada - BC e Bauxita Cristalizada/Bauxita Amorfa – BCBA) de um depósito bauxítico localizado na Província Bauxítica de Paragominas (PBP) – Pará, Brasil. O estudo demonstrou que os critérios de classificação atualmente utilizados, especialmente o limitante associado à geometria das malhas de sondagem, é conservador em relação ao critério de Harry Parker e que o espaçamento ideal de sondagem para definição de recursos minerais seriam 600 m × 600 m para Recursos Indicados e 300 m × 300 m para Recursos Medidos. Esses resultados podem ser utilizados para revisão dos critérios de classificação e na tomada de decisão a respeito da necessidade ou não de novas campanhas de sondagem para a conversão de recursos minerais.

**Palavras-chave:** análise da incerteza; simulações condicionais; bauxita.

## ABSTRACT

Errors or uncertainties in estimating mineral resources can compromise strategic planning and mineral processing decisions or make a mining project unfeasible. In this sense, to assess the degree of uncertainty and risk quantification associated with different drilling grids, DHSA (Drill Hole Spacing Analysis) methodology was used, based on conditional simulation by Turning Bands Simulation (TBS) with implementation in the software Isatis.neo Mining Edition®. Uncertainty related to the reactive silica (SIRE) estimates was investigated from multiple equiprobable scenarios for the mineralized zone (Crystalized Bauxite - BC and Crystallized Bauxite/Amorphous Bauxite - BCBA) of a bauxitic deposit located in the Bauxitic Province of Paragominas (PBP) - Pará, Brazil. The study demonstrated that the classification criteria currently used, especially the one associated with the geometry of the drilling grids, is conservative in relation to Harry Parker's criterion and that the ideal drilling spacing for classifying mineral resources would be 600 m × 600 m for Indicated Resources and 300 m × 300 m for Measured Resources. These results can be used to review the classification criteria and in decision-making regarding the need or not for new drilling campaigns for the conversion of mineral resources.

**Keywords:** uncertainty analysis; conditional simulations; bauxite.

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2 - MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>7</b>
2.1 – Localização e contexto geológico.....	7
2.2 – Análise exploratória e tratamento estatístico dos dados.....	8
2.3 – Análise de incerteza associada aos recursos minerais.....	9
<b>3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>11</b>
<b>4 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>14</b>

## 1 - INTRODUÇÃO

A classificação de recursos minerais envolve um esforço importante na identificação e diminuição do grau de incerteza das informações utilizadas na estimativa e consiste na categorização dos blocos estimados nas classes medida, indicada e inferida, de acordo com o nível de confiança das estimativas de massas e teores (JORC, 2012). Nestas circunstâncias, tão importante quanto a estimativa de tonelagens e teores, é a quantificação das incertezas associadas.

A estimativa de recursos minerais é realizada por métodos geoestatísticos e clássicos a partir de dados amostrais com variáveis regionalizadas (MATHERON, 1963). Entretanto, a estimativa de recursos pelos métodos convencionais não é capaz de englobar a real variabilidade dos dados in situ. A krigagem, por exemplo, embora seja um método eficaz para a obtenção de valores médios globais para o depósito, tende a suavizar detalhes locais da variabilidade espacial do atributo (GOOVAERTS, 1997), tornando-os inadequados para uma série de outras aplicações como, por exemplo, reconciliação e de avaliação de incertezas (SALDANHA, 2020). Nesse sentido, as técnicas de simulação condicional surgem como alternativa complementar à krigagem e útil para avaliar o grau de incerteza e os riscos associados através da geração de cenários equiprováveis (DIMITRAKOPOULOS, 2002), pois são capazes de reproduzir tanto a variabilidade in situ quanto a continuidade espacial dos dados originais (VERLY et al., 2014). A simulação condicional pode ser utilizada para análise de riscos, na estimativa de recursos recuperáveis (tonelagem acima de determinado cut-off), na análise de malha ideal de amostragem (MARTÍNEZ-VARGAS, 2017) e/ou na classificação de recursos com base em incertezas (VERLY et al. 2014), por exemplo.

A simulação da malha de amostragem associada à classificação de recursos minerais vem sendo aplicada em diferentes minas em operação e para diferentes commodities, como ferro, ouro, níquel (KOPPE et al., 2016) e cobre (AMARAL, 2022) e bauxita (ABZALOV & BOWER, 2009; USERO et al. 2019). A metodologia Drill Hole Spacing Analysis (DHSA), apresentada por BERTOLI et al., (2010) e também abordada por USERO (2019), utiliza simulação condicional e o conceito de intervalo de confiança e volumes de produção para o cálculo da incerteza associada à estimativa de teores de um depósito específico, prevendo o risco associado à determinados espaçamentos de malha afim de suportar decisões a respeito da necessidade ou não de novas campanhas de sondagem para a conversão de recursos minerais (VERLY et al., 2014).

Deste modo, este artigo tem o objetivo de quantificar a incerteza associada aos recursos minerais através da metodologia DHSA (BERTOLI et al., 2010; VERLY et al., 2014), com uso de simulação condicional, para a variável sílica reativa (SIRE) em um depósito de bauxita localizado na Província Bauxitífera de Paragominas (PBP) - Pará, Brasil e, deste modo, identificar a malha ótima de sondagem.

## 2 - MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 – Localização e contexto geológico

A área de estudo está localizada no domínio central da Província Bauxítica de Paragominas (PBP), nordeste do estado do Pará, na Amazônia Oriental, Brasil (Figura 1). A PBP representa um dos mais importantes, extensos e densos agrupamentos de depósitos de bauxita do Brasil, com potencial de mais de 3 bilhões de toneladas de minério metalúrgico, cerca de 70% das reservas brasileiras de bauxita (KOTSCHOUBEY et al., 2005).

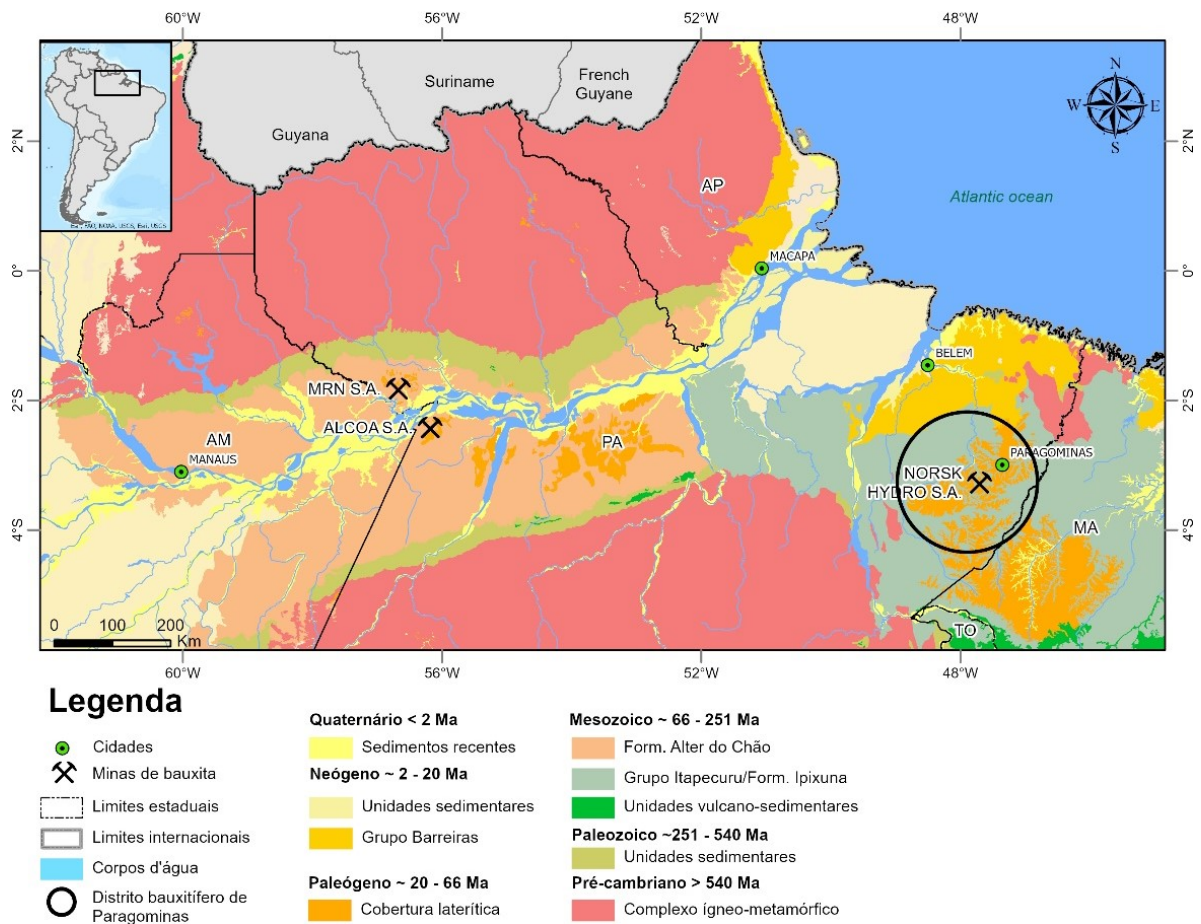


Figura 1 – Mapa geológico simplificado exibindo com localização regional da Província Bauxitífera de Paragominas (PBP).



A PBP é caracterizada por um relevo de planaltos coberto por uma espessa camada de argilas (argila de Belterra) e crostas ferroaluminosas. A formação desses depósitos é atribuída à alteração laterítica de depósitos siliciclásticos do Cretáceo, no caso, sedimentos da Formação Itapecuru e da Formação Ipixuna, durante o Paleógeno (KOTSCHOUBEY et al., 2005). Nessa região, o horizonte com interesse econômico compreende a porção inferior do perfil laterítico formado por uma camada maciça de cor avermelhada com abundantes cristais milimétricos de gibbsita e óxidos de ferro, subdividindo-se em bauxita cristalizada (BC) e bauxita cristalizada com bauxita "amorfa" (BCBA), que marca a transição para o nível argiloso na base do perfil.

## 2.2 - Análise exploratória e tratamento estatístico dos dados

A metodologia adotada neste estudo foi completamente desenvolvida no software Isatis.neo Mining Edition® (BLEINES et al. 2012) a partir do banco de dados constituído por 3593 furos de sondagem e 10275 amostras (Figura 2). A estatística básica das variáveis de interesse encontra-se sintetizada abaixo (Tabela 1) e os valores referem-se a base lavada em 20# da zona mineralizada principal (BC e BCBA).

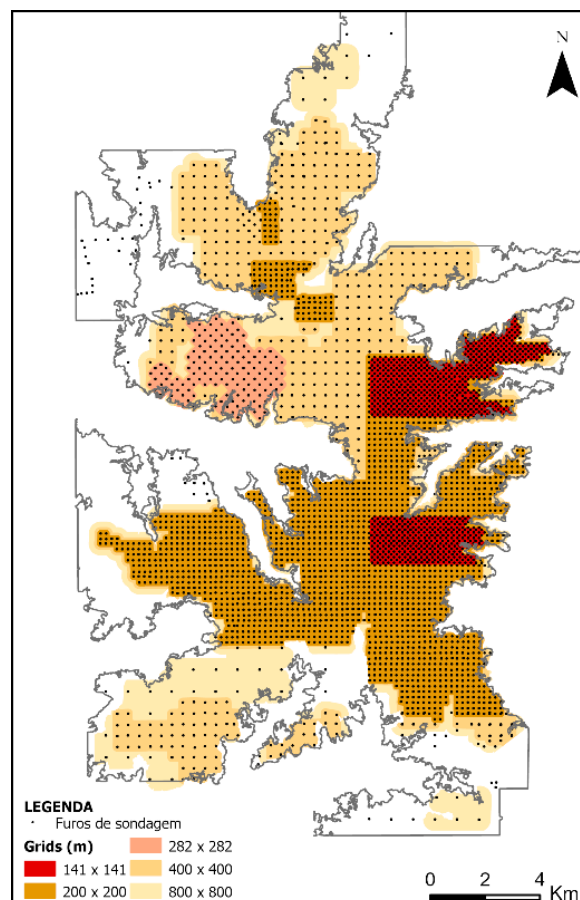


Figura 2 – Mapa geológico simplificado exibindo com localização regional da Província Bauxitífera de Paragominas (PBP).

O horizonte de BC, por ser o horizonte principal de minério, apresenta os maiores teores de alumina aproveitável (ALA) e menores valores de sílica reativa (SIRE). Esta última é o principal elemento deletério ao processo de refino da bauxita pois tem relação direta com o consumo de soda cáustica durante o processo Bayer (BELL, 1970) e apresenta maior variabilidade no depósito mineral conforme indicado pelo maior coeficiente de variação. Portanto, optou-se por prosseguir apenas com a simulação da SIRE, uma vez que esta representa o principal parâmetro de controle e cuja variabilidade irá requerer malhas mais adensadas quando comparada com alumina aproveitável (ALA) e espessura, conforme já indicado em estudos prévios (KARNIOL et al. 2021).

Tabela 1 – Análise exploratória do banco de dados de sondagem para as variáveis de interesse (valores em porcentagem reportados na base lavada em 20#).

<b>Litologia</b>	<b>Variável</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Variância</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>CV</b>	<b>Amostras</b>
BC	ALA	14.50	57.94	46.10	28.60	5.35	0.11	5482
	SIRE	0.10	16.30	4.11	3.58	1.89	0.46	5482
BCBA	ALA	17.06	58.70	43.62	45.92	6.78	0.15	4793
	SIRE	0.27	23.40	7.59	7.14	2.67	0.35	4793

$\Sigma$ = Média;  $\sigma$  = desvio padrão; CV= Coeficiente de variação

Após a análise exploratória, a distribuição dos dados foi transformada em uma distribuição normal (anamorfose gaussiana) utilizando os pesos de desagrupamento. Em seguida, a continuidade espacial dos dados foi definida a partir de variogramas direcionais no espaço gaussiano para uso no processo de simulação.

### 2.3 – Análise de incerteza associada aos recursos minerais

A análise de incerteza associada aos recursos minerais foi realizada através da metodologia DHSA - Drill Hole Spacing Analysis (BERTOLI et al, 2010; USERO et al. 2019), com uso de simulação condicional a partir da variável sílica reativa (SIRE %) para a zona mineralizada (Bauxita Cristalizada - BC e Bauxita Cristalizada/Bauxita Amorfa – BCBA).

A metodologia adotada neste estudo encontra-se sintetizada na Figura 3 e consistiu basicamente em quatro etapas: a) simulação condicional pelo método de Turning Bands (TBS) e criação de 50 cenários equiprováveis; b) escolha de um cenário de referência com auxílio da ferramenta “Simulation Reduction”; c) geração de malhas de furos virtuais com 100 x 100 m, 200 x 200 m, 300 x 300 m, 400 x 400 m, 500 x 500 m e 600 x 600 m de espaçamento; d)

novas rodadas de simulação (TBS) em cada padrão de amostragem com o objetivo de obter-se a dispersão referente ao atributo simulado em um intervalo de confiança de 90%, considerando a produção mensal e anual (VERLY et al. 2014; USERO et al. 2019).

Embora todos os 50 cenários gerados sejam equiprováveis a escolha de um cenários de referência é uma etapa necessária para geração das diferentes malhas virtuais pois reduz o número original de realizações preservando as estatísticas do conjunto de simulação original.

A simulação por bandas rotativas (TBS) consiste inicialmente no desenho de diversas bandas concêntrica rotacionadas no espaço a partir da decomposição da função aleatória definida pelo variograma (LANTUÉJOU, 2002). Em seguida, gera-se um modelo não condicional respeitando a variabilidade espacial e distribuição de probabilidade original do banco de dados e, por fim, realiza-se a simulação condicional das bandas rotativas através de um pós-processamento usando krigagem simples dos resíduos (JOURNAL, 1974).

Antes de prosseguir com o pós-processamento para estimativa da incerteza as simulações geradas foram validadas visualmente e graficamente para verificação da reprodutibilidade do variograma e histograma.

Por fim, o cálculo da incerteza da estimativa no suporte dos volumes de produção foi realizado com base em Koppe et al., (2016) através do MME (Maximum Estimated Error) descrito na equação 1 abaixo:

$$MME (i) = \frac{[(Q95(i) - Q5(i))/2]}{E_{type}(i)} \quad (1)$$

Onde Q95(i) e Q5(i) são os percentis de 95% e 5% das simulações para um bloco i, delimitando um intervalo de confiança – IC de 90%, e o E(type) é a média dos valores simulados para o bloco i. Essa média é equivalente ao valor estimado para o bloco i se o algoritmo de interpolação por krigagem tivesse sido usado (MATHERON, 1963).

Os resultados da simulação para cada malha de sondagem são então redimensionados para incrementos de produção anual e mensal, gerados pela reunião dos blocos simulados até a tonelagem equivalente a um ano ou uma produção mensal da operação (USERO et al. 2019). Para essa etapa, considerou-se um volume de produção anual média (ROM – Run of Mine) de 11 Mt em que 59% é constituído por BC e 41% por BCBA.

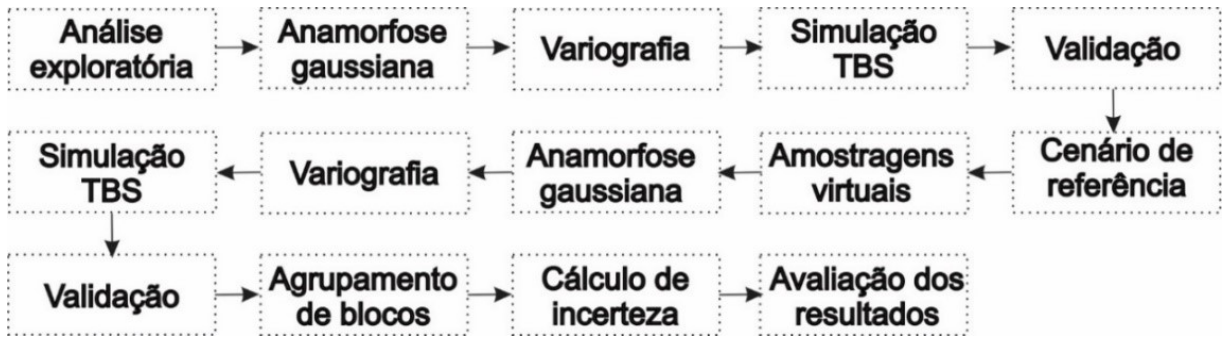


Figura 3 – Fluxograma sintetizando as principais etapas adotadas neste trabalho.

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das 50 realizações por *Turning Bands Simulation* (TBS) foi possível gerar produtos como média (*E-type*), Mínimo, Máximo, Desvio-padrão, distribuição de probabilidades e Variância (Figura 4). Nota-se que os menores teores de SIRE estão localizados na porção centro-leste da área de estudo, inclusive com baixas probabilidades de teores acima dos cut-offs de 3% e 5% para BC e BCBA, respectivamente. Além disso, as maiores variâncias encontradas estão associadas ao maior espaçamento da malha de sondagem (Figura 4).

Os gráficos da Figura 5 mostram os resultados de incerteza da SIRE na área analisada, para a zona mineralizada (BC e BCBA), de acordo com a geometria das malhas de sondagem e cenários de produção mensal e anual.

O estudo mostra que os erros relativos da estimativa dos teores médios (MME) de SIRE são menores na bauxita cristalizada/bauxita amorfa (BCBA) do que na bauxita cristalizada (BC) e verifica-se que o MEE aumenta com o espaçamento do grid amostral. Entretanto, segundo AMARAL (2022) este não é condicionado apenas pelo espaçamento do grid de sondagem, mas também pelos blocos de produção (volume e dimensão), da variabilidade dos dados dentro das regiões dos blocos e do modelo de continuidade de cada atributo analisado.

De acordo com o “critério de Harry Parker” (VERLY et al. 2014), os dados relacionados a malhas de sondagem que resultem em 15% de erro com intervalo de confiança de 90% são adequados para definir recursos indicados, com base em volumes de produção anuais. Enquanto os recursos medidos são definidos com base em volumes de produção mensal ou trimestral, dependendo do tipo de mineralização e commodity.

Com base na distribuição das incertezas, a malha de 300 x 300 m está associada a uma incerteza de 14,96% e 11,23% em um cenário de produção mensal para BC e BCBA, respectivamente. Portanto, segundo o critério de Harry Parker, seria adequada à classificação de recursos medidos, enquanto, no critério atual, é considerada a malha de 200 x 200 m como critério limitante para esta categorização. Do mesmo modo, considerando um cenário de produção anual, obteve-se para a sílica reativa, uma incerteza de 10,10% e 9,34% na malha de 600 x 600 m, para BC e BCBA, respectivamente. Portanto adequada à classificação em recurso indicado, enquanto no critério atual considera-se a malha de 400 x 400 m.

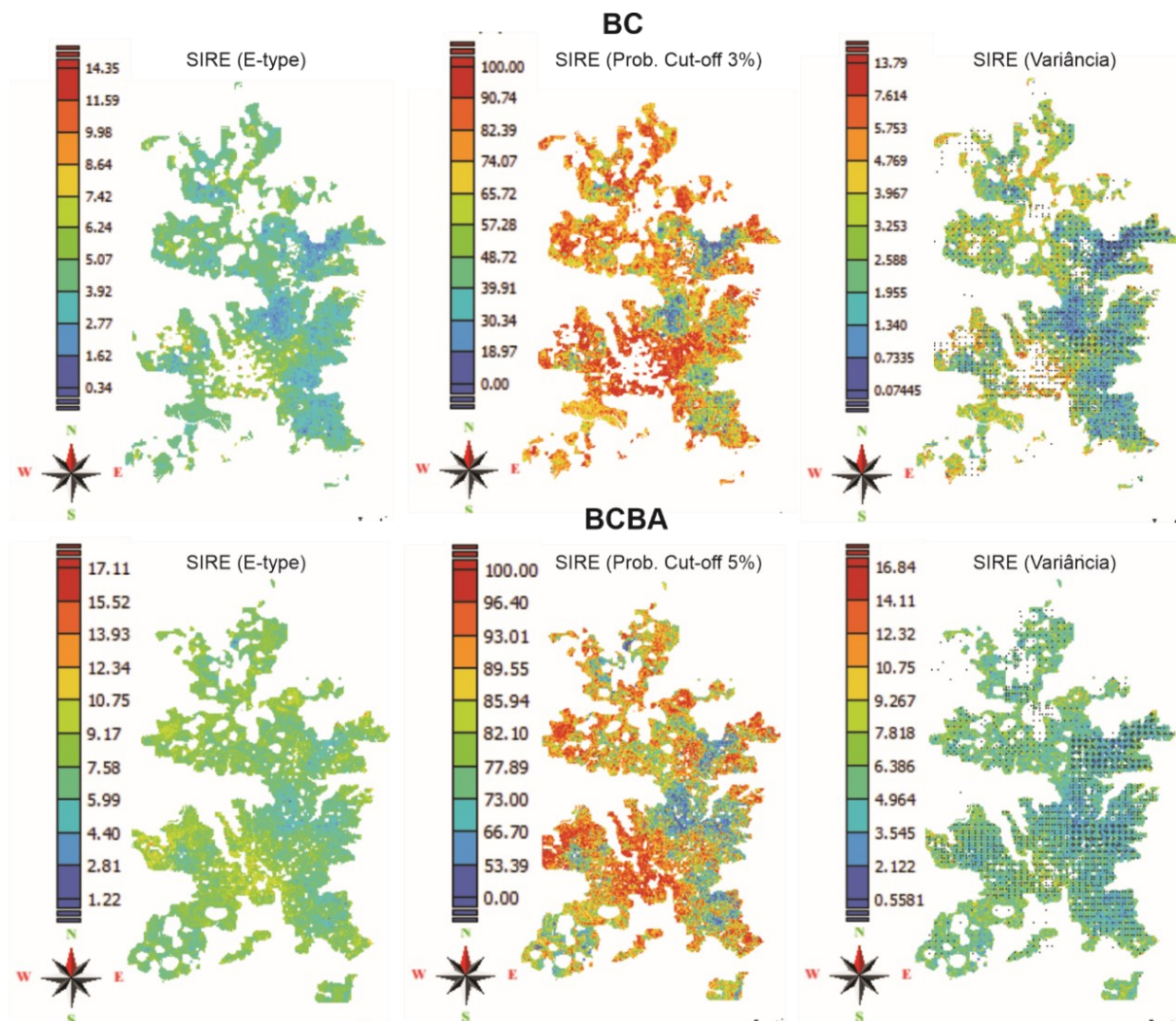


Figura 4 – Mapas de distribuição exibindo a média das 50 realizações (*E-type*), probabilidades de teores acima dos cut-offs estabelecidos e variância entre as simulações.

Deste modo, o espaçamento ideal de sondagem para definição de recursos minerais nesta área de estudo seria 600 m × 600 m para Recursos Indicados e 300 m × 300 m para Recursos Medidos.

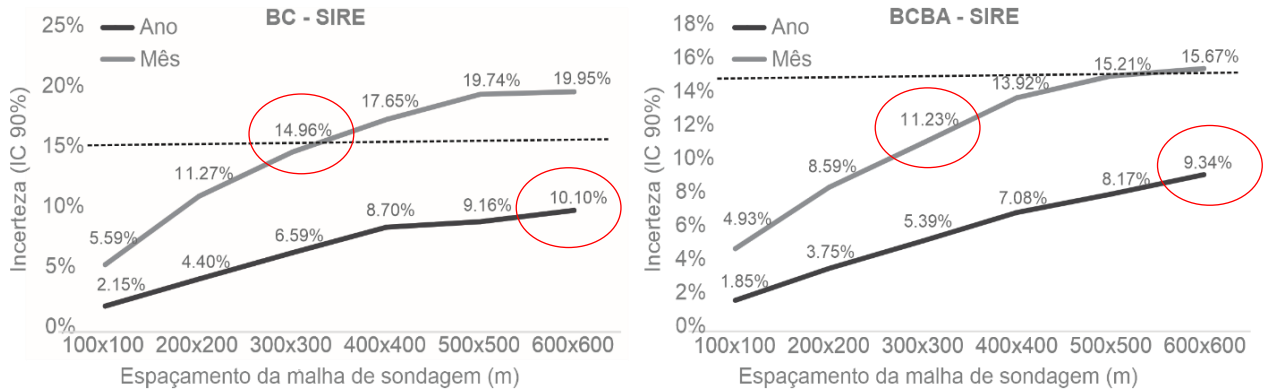


Figura 5 – Média da incerteza em torno da média dentro de um IC de 90% dos seis cenários redimensionados em bases mensal (recurso medido) e anual (recurso indicado).

#### 4 - CONCLUSÕES

No depósito mineral analisado, a sílica reativa é a variável com maior variabilidade e, portanto, irá requerer uma malha de sondagem mais densa para redução das incertezas associadas quando comparada com as outras variáveis de interesse como alumina aproveitável (ALA) e espessura.

Partindo-se da sílica reativa (SIRE), o estudo demonstrou que os critérios de classificação atualmente utilizados, especialmente o limitante associado à geometria das malhas de sondagem, é conservador em relação ao critério de Harry Parker e que o espaçamento ideal de sondagem para definição de recursos minerais seriam 600 m × 600 m para Recursos Indicados e 300 m × 300 m para Recursos Medidos. Portanto, uma malha mais espaçada do que vem sendo atualmente utilizada na região de estudo.

Esses dados poderão suportar a tomada de decisão a respeito da necessidade ou não de novas campanhas de sondagem para a conversão de recursos minerais com grande potencial de otimização de recursos financeiros.

No futuro pretende-se realizar uma análise de sensibilidade para definição das premissas de volume de produção e intervalo de confiança para classificação dos recursos medido e indicado visando a consolidação de um critério seguro de classificação que incorpore essa metodologia mais atual e largamente empregada na indústria, como é o caso do critério de Harry Parker.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABZALOV, M Z AND BOWER, J, 2009. Optimization of the drill grid at the Weipa bauxite deposit using conditional simulation, In: Proceedings Seventh International Mining Geology Conference 2009, pp 247-252 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- [2] AMARAL, A.M.R. Estudo De Malha Ótima e Correlação do Máximo Erro da Estimativa (MEE) entre Volumes De Produção de Longo e Curto Prazo. **Dissertação (Mestrado em Engenharia)** – Programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 94. 2022.
- [3] BELL, G. M., "Alumina Losses in Bayer Process". Behavior of Silicate Minerals in Digestion. Progress Report, 3-70-1, 1970.
- [4] BERTOLI, O., CASLEY, Z., MAWDESLEY, C., DUNN, D., 2010. Drill hole spacing analysis for Coal Resource Classification. Proceedings of 6th Bowen Basin Symposium 2010, Mackay, QLD, Australia.
- [5] BLEINES, C., DERAISME, J., GEFFROY, F., PERSEVAL, S., RAMBERT, F., RENARD, D., TOUFFAIT, Y., WAGNER, L. 2012. ISATIS software manual. Geovariances and Ecole des Mines de Paris. 531 pp.
- [6] DIMITRAKOPOULOS, R, 2002. Orebody uncertainty, risk assessment and profitability in recoverable reserves, ore selection and mine planning, Workshop course, BRC, The University of Queensland, 304 p.
- [7] GOOVAERTS, Pierre. Geostatistics for natural resources evaluation. New York, Oxford University Press. 483p, 1997.
- [8] JORC, 2012. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code). Disponível em: <http://www.jorc.org> Acesso em 20 de jun. 2022.
- [9] JOURNAL, A. G. Geostatistics for conditional simulation of ore bodies. Economic Geology, SecG, v. 69, n. 5, p. 673–687, 1974.
- [10] KARNIOL, T. et al. 2021. Estimativa de recursos minerais – Hydro Brasil. Relatório para comunicação interna, MPSA/Hydro Brasil.
- [11] KOPPE, V. C., RUBIO, R. H., & Costa, J. F. C. L. (2016). A chart for judging optimal sample spacing for ore grade estimation. Natural Resources Research, 26(2), 191–199.
- [12] KOTSCHOUBEY, Basile; et al., Caracterização e Gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, Noroeste da Bacia de Grajaú, Nordeste do Pará/Oeste do Maranhão. In: Marini Onildo João et al. (orgs.). Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. Brasília, DF, DNPM-CT Mineral, ADIMB, 2005, 613-698.
- [13] LANTUÉJOUL, C. Geostatistical simulation: models and algorithms. [S.l.: s.n.], 2002. 256 p.

- [14] MARTÍNEZ-VARGAS, Adrián. Optimizing grade-control drillhole spacing with conditional simulation. *Minería y Geología* 33 (2017): 1-12.
- [15] MATHERON G. Principles of geostatistics. *Economic geology*, 58, 1963, p. 1246-1266.
- [16] SALDANHA, A.A. Definição de Estratégia de Sondagem Para Aumento Na Conversão De Recursos E Reservas. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 74. 2020.
- [17] USERO, G., S. MISK, and A. SALDANHA. "An approach for drilling pattern simulation." *Mining Goes Digital*. CRC Press, 2019. 59-66.
- [18] VERLY, G., POSTOLSKY, T., PARKER H.M., 2014, Assessing uncertainty with drillhole spacing studies: applications to mineral resources, In: *AusIMM: Orebody Modelling and Strategic Mine Planning 2014*, Paper No. 72, 23 pp.