

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais -  
PPGEM

Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro - LPM

Flávio Azevedo Neves Amarante

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO MODELO GEOLÓGICO  
ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS ESTOCÁSTICOS**

PORTO ALEGRE

2018



FLÁVIO AZEVEDO NEVES AMARANTE

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO MODELO GEOLÓGICO  
ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS ESTOCÁSTICOS.**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Porto Alegre

2018

Azevedo Neves Amarante, Flávio  
AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO MODELO  
GEOLÓGICO ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS  
ESTOCÁSTICOS / Flávio Azevedo Neves Amarante. --  
2018.

154 f.

Orientador: Professor Dr. João Felipe Coimbra  
Leite Costa.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Geoestatística. 2. Modelo geológico. 3.  
Geoestatística multipontos. 4. Modelagem implícita. 5.  
Incerteza. I. Felipe Coimbra Leite Costa, Professor  
Dr. João, orient. II. Título.



FLÁVIO AZEVEDO NEVES AMARANTE

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO MODELO GEOLÓGICO  
ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS ESTOCÁSTICOS.**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Trabalho aprovado. Porto Alegre, 05 de Setembro de 2018:

---

Professor Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa  
*Orientador*

---

Professora Dra. Vanessa Cerqueira Koppe  
*PPGE3M - UFRGS*

---

Professor Dr. Diego Machado Marques  
*IGEO - UFRGS*

---

Dr. Marcel Antonio Arcari Bassani

Porto Alegre

2018



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. João Felipe C. L. Costa pela oportunidade de fazer parte do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro e pela paciência e dedicação, sempre compartilhando seu vasto conhecimento e auxiliando sempre que possível no meu crescimento profissional e pessoal.

Aos colegas do LPM que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho, Roberto Rollo, David Drummond e Átilla Leães. Aos demais colegas de laboratório, em especial, Ryu Okada, Rudi Modena, Augusto Torres e José Guilherme.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais (PPGEM).

À minha família, pelo suporte em todos os momentos. À Marcella pelo companheirismo e apoio.

Ao conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico (CNPQ) pelo auxílio financeiro.

À Companhia Vale do Rio Doce por disponibilizar o banco de dados para este trabalho.



*“Há uma limitação desconcertante de nossa mente: nossa confiança excessiva no que acreditamos saber, e nossa aparente incapacidade de admitir a verdadeira extensão da nossa ignorância e a incerteza do mundo em que vivemos.”*

*(Daniel Kahneman)*



## RESUMO

A avaliação de recursos minerais necessita da delimitação prévia de domínios estacionários para cálculo dos volumes do depósito mineral. O conhecimento a respeito dos processos geológicos de formação do depósito são traduzidos em modelos geológicos, essenciais para o planejamento da produção e à tomada de decisões a respeito da tecnologia e os recursos a empregados no empreendimento. A indústria mineral, normalmente, considera a incerteza dos teores na avaliação de recursos, entretanto a incerteza relacionada ao modelo geológico geralmente não é avaliada. Essa incerteza está relacionada a localização do limite entre domínios geológicos, e é uma das principais fontes de incerteza do empreendimento mineral. A incerteza do modelo geológico deve ser avaliada devido o potencial impacto no volume de recursos do depósito, e conseqüentemente na lucratividade do empreendimento. Esta dissertação busca avaliar a incerteza associada ao modelo geológico, através de três metodologias que possibilitam construir múltiplas realizações para domínios geológicos. Um banco de dados real com alta complexidade é utilizado na construção dos estudos de caso de cada metodologia e os resultados comparados com o modelo determinístico utilizado como referência. Dentre os métodos, a metodologia do parâmetro da incerteza C representou melhor a incerteza volumétrica, e portanto, foi selecionado para gerar o modelo geológico final, e demonstrar a importância da avaliação da incerteza na construção de modelos geológicos.

**Palavras-chave: modelo geológico; geoestatística multipontos; modelagem implícita; incerteza.**





## **ABSTRACT**

The evaluation of mineral resources requires the prior delimitation of a stationary domain geologically controlled. The knowledge about the ore genesis and geological processes involved are translated into geological models, essential for planning the production and decision-making regarding the technology and resources applied in the enterprise. The mineral industry usually considers the grade uncertainty in the evaluation of resources, however the uncertainty related to the geological model is generally under evaluated. This uncertainty related to the location of the boundary between geological domains is the great source of uncertainty in the mineral enterprise. The geological model uncertainty should be assessed due to the potential impact on the volume of deposit, and consequently the profitability of the enterprise. This dissertation evaluates the uncertainty associated to the geological model, through three methodologies that generate multiple realizations for geological domains. A real database with high geological complexity is used in the construction of the case studies for each methodology and the results compared to the deterministic model used as a benchmark. Among the methods, the uncertainty calculation methodology C was selected to generate the final geological model, and to demonstrate the importance of uncertainty evaluation in the construction of geological models.

**Key-Words: geological model; multipoint geostatistics; implicit modeling; uncertainty.**



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1: Esquema em 2D ilustrando um modelo determinísticos à esquerda com modelos implícitos estocásticos à direita. Os modelos implícitos estocásticos permitem acessar a incerteza volumétrica total ao variar o local dos contatos entre os furos de sondagem (Modificado de McLennan e Deutsch 2006). .....	2
Figura 2-1: A formação rochosa acima mostra uma inconformidade angular entre xistos e metagrauvacas encontrada na costa de Portugal na Praia do Telheiro (Fonte: <a href="http://www.geologyin.com/2015/01/amazing-angular-unconformity.html">http://www.geologyin.com/2015/01/amazing-angular-unconformity.html</a> ). .....	9
Figura 2-2: Modelagem geológica explícita (Modificado de Kavouras, 1995). .....	10
Figura 2-3: Em A está representada a linha dividida em três partes pelos pontos $x=-1$ e $x=1$ . B apresenta a função implícita $\Phi x = x^2 - 1$ que define as regiões $\Omega -$ e $\Omega +$ e a interface $\vartheta\Omega$ . (Modificado de Osher e Fedkiw, 2003) .....	11
Figura 2-4: Função distância assinalada $\Phi x = x - 1$ que define as regiões $\Omega -$ e $\Omega +$ e a interface $\vartheta\Omega$ . (Modificado de Osher e Fedkiw, 2003). .....	12
Figura 2-5: Metodologia funções distâncias assinaladas aplicada em dados de furos de sondagem. (Modificado de McLennan e Deutsch 2006) .....	13
Figura 2-6: Abordagem conceitual para modelagem hierárquica. (Modificado de Pyrcz e Deutsch, 2014) .....	14
Figura 2-7: Princípio da simulação por bandas rotativas em 2D (modificado de Chiles e Delfiner, 1999).....	19
Figura 2-8: Esquema síntese dos elementos comuns aos algoritmos de MPS. (Adaptado de Mariethoz & Caers, 2015) .....	21
Figura 3-1: Fluxograma ilustrado das metodologias adotadas para caracterizar a incerteza dos contatos. A esquerda está representada o fluxograma do método MPS. No centro e a direita, estão representados os fluxogramas de duas metodologias de modelagem implícita por funções assinaladas. ....	22
Figura 3-2: Exemplo de <i>template</i> ou vizinhança de busca com 4 vetores (Rasera, 2014). .....	24
Figura 3-3: Imagem de treinamento para duas categorias e <i>template</i> de busca.....	25
Figura 3-4: Árvore de busca obtida a partir da imagem de treinamento e o <i>template</i> descritos anteriormente (Modificado de Boucher, 2007). .....	26
Figura 3-5: Método <i>contactsim</i> para quatro categorias (amarela, cinza, verde e vermelha). No lado esquerdo em A, o modelo de referência utilizado. Em B e C, são apresentadas as zonas de incerteza para 20 e 40 metros em relação ao contato. Em D e E, a classificação das zonas de incerteza em diferentes grupos, que serão armazenados na estrutura da árvore de busca. ....	28
Figura 3-6: Simulação do modelo de referência para dois tamanhos da zona de incerteza. Na parte superior da imagem, de A a D quatro realizações para a zona de incerteza de 20 metros. Na parte inferior da imagem, E a H quatro realizações para a zona de incerteza de 40 metros. ....	29
Figura 3-7: Método distâncias assinaladas. O canto superior esquerdo, as amostras no plano xy divididas nos domínios (pontos pretos e brancos identificando cada domínio). A imagem do canto superior direito apresenta a função distância assinalada	

calculada para cada amostra. No canto esquerdo inferior, a função distância interpolada para todos os locais de interesse. No canto direito inferior, o modelo construído a partir da função distância assinalada (preto e branco). .....	31
Figura 3-8: Determinação da zona de incerteza. Em A, o modelo geológico determinístico. Em B, o modelo com valores <i>U</i> . Em C, zona de incerteza para o <i>cutoff</i> de 0,65. Na parte inferior da imagem, de D a F três realizações para a zona de incerteza.....	34
Figura 3-9: Zona de incerteza para diferentes valores do parâmetro <i>C</i> . A região preta está dentro do domínio, a região branca está fora do domínio e a região cinza representa a zona de incerteza. ....	36
Figura 3-10: Classificação dos locais comparando valores estimados e simulados (Modificado de Wilde e Deutsch, 2011a).....	36
Figura 3-11: Depósito de cobre pórfiro. Na região esquerda da figura, é apresentada a localização das amostras e na região da direita o esquema dos grupos gerados pela hierarquia e seus respectivos indicadores. ....	37
Figura 3-12: Construção do modelo geológico. No canto superior direito, realização 16 para o modelo geológico. No canto superior esquerdo, as regras estabelecidas para a construção dos modelos. Na região inferior da imagem, as realizações 2, 8 e 16 dos domínios geológicos para cada categoria. As categorias 2 à 6 estão ordenadas da esquerda para a direita. ....	38
Figura 3-13: Imagem do menu com os algoritmos do software SGeMS e a opção DFMOD. ....	39
Figura 3-14: Plug-in <i>signed distances C</i> .....	40
Figura 3-15: Plug-in <i>Classifier C</i> . Visão da aba <i>general</i> e da aba <i>variogram interpolation</i> .....	41
Figura 3-16: Plug-in <i>Classifier C</i> . Visão da aba <i>simulation</i> , da aba <i>variogram simulation</i> e da aba <i>options</i> .....	42
Figura 4-1: A figura apresenta a localização das amostras, a imagem da região superior apresenta a vista em planta dos furos de sondagem. A imagem inferior apresenta a vista em perspectiva dos dados provenientes de furos de sondagem. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	44
Figura 4-2: A figura apresenta o modelo Lito 4 do depósito de ferro S11D. Na imagem superior A, é apresentado o modelo geológico completo. A imagem B apresenta a seção geológica no eixo Y corte 75 do modelo. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.....	45
Figura 4-3: A figura apresenta o modelo Lito 4 do depósito de ferro S11D. Na imagem C, está representado o corte 15 em planta do modelo e na imagem D a seção nortesul corte 140 do mesmo modelo. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.....	46

Figura 4-4: A figura apresenta os dados categóricos utilizados ao aplicar o algoritmo <i>contactsim</i> de MPS. A imagem A apresenta a localização dos dados provenientes de furos de sondagem. A imagem C apresenta o modelo de referência utilizado como imagem de treinamento. As imagens B e D apresentam os histogramas dos dados e do modelo de referência, respectivamente. Nas imagens, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	48
Figura 4-5: A figura apresenta a zona de incerteza para 100m construída pelo algoritmo <i>contactsim</i> na imagem A e o complemento da zona de incerteza na imagem B. Nas imagens, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	49
Figura 4-6: A figura exibe a partição em grupos dos tipos de contatos entre domínios. Na imagem superior, vista em planta da zona de incerteza dividida nos respectivos grupos e na imagem inferior vista em perspectiva. Nas imagens, é possível identificar os 11 grupos de contatos dos diferentes tipos de contatos entre categorias. As cores de cada grupo são apresentadas na escala de cores, a cor vermelho escuro, por exemplo, representa o grupo 6.....	50
Figura 4-7: A figura exibe as realizações 0, 5,10 e 15 da zona de incerteza de 100m obtidas através da simulação. Nas imagens, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. Note a diferença visual entre as proporções gerais de cada realização.....	52
Figura 4-8: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 0 dos estéreis da cor verde escura. Note em 1 a variabilidade das intrusivas presentes no modelo. Ao comparar as realizações em 2 fica evidente a variabilidade do volume da falha preenchida por intrusivas. ....	53
Figura 4-9: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 1 da hematita na cor amarela. Note a variabilidade do volume do conjunto de blocos dispersos da hematita. ....	54
Figura 4-10: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e15 da categoria 2 da canga superficial da cor roxa. Note em 1 a variabilidade em volume dos blocos dispersos da canga, o domínio apresenta baixa continuidade espacial. A variabilidade da continuidade do domínio é apresentada em 2.....	55
Figura 4-11: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e15 da categoria 3 dos jaspelitos na cor vermelha. Note em 1 a mudança na quantidade de blocos contínuos formando o domínio dos jaspelitos.....	56
Figura 4-12: Comparação entre a proporção das 50 realizações obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência. Na imagem a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	57
Figura 4-13: A imagem apresenta as seções verticais da realização 5 evidenciando que os dados foram honrados. Seções Leste-Oeste nos cortes 60, 120 e 180 do modelo de blocos de A a C, evidenciando nas regiões demarcadas por círculos 1, 2, 3 e 4 que os dados são respeitados na simulação. Seções norte-sul nos cortes 100 e	

300 do modelo de blocos em D e E, comprovando que os dados foram honrados. Note as regiões 5 e 6 que demonstram q os dados foram respeitados durante a simulação. Nas imagens, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor cinza a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....58

Figura 4-14: Histograma categórico litologias. No histograma a categoria zero representa os estéreis, a categoria 1 representa a hematita, a categoria 2 representa a canga superficial e a categoria 3 representa os jaspelitos. ....59

Figura 4-15: A figura exhibe o banco de dados utilizado ao aplicar os métodos implícitos. O banco de dados é composto de dados provenientes de furos de sondagem e dados obtidos a partir das seções geológicas interpretadas. A imagem superior apresenta as seções geológicas interpretadas adicionadas ao banco de dados original e a imagem inferior apresenta o banco de dados completo em perspectiva. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....60

Figura 4-16: A figura apresenta as distâncias assinaladas calculadas para cada litologia. Em A as distâncias assinaladas calculadas para a categoria 0. Em B as distâncias assinaladas calculadas para a categoria 1. Em C as distâncias assinaladas calculadas para a categoria 2. Em D, as distâncias assinaladas calculadas para a categoria 3. A escala de cores de cores está associada a distância de um tipo categórico ao tipo categórico distinto, as cores escuras representam valores baixos os quais pertencem ao domínio de interesse, enquanto as cores vermelhas e quentes representam valores positivos, ou seja, regiões externas ao domínio de interesse..61

Figura 4-17: Modelo geológico gerado obtido a partir da interpolação das distâncias assinaladas. Note a transição suave e realista entre as litologias. Na imagem, a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.....63

Figura 4-18: A figura exhibe o resultado da interpolação de cada categoria. São apresentadas cada categoria separadamente do modelo interpolado. Note nos círculos a presença de blocos isolados e dispersos nas quatro categorias. Nas imagens, a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....64

Figura 4-19: A figura apresenta o modelo ucof e o gráfico de probabilidade utilizado para construção da zona de incerteza. A imagem A apresenta o modelo *ucof* das menores distâncias, na qual a escala de cores representa a incerteza associada aos contatos entre domínios. Valores elevados na cor vermelha representam grande incerteza e valores baixos na cor azul representam baixa incerteza. A imagem B exhibe o gráfico de probabilidade do modelo ucof, que demonstra a mudança no padrão selecionada para a seleção do *cutoff*. ....65

Figura 4-20: A imagem A exhibe a zona de incerteza definida a partir do modelo *ucof*, na qual a escala de cores representa a distinção entre categorias. A imagem B exhibe a seção leste-oeste no corte 70 do modelo *ucof*, responsável pela incerteza da localização do contato geológico e a imagem C apresenta a seção corte 70 no *cutoff*

de 0,85 do modelo *ucof* estabelecida para gerar a zona de incerteza. Nas duas últimas imagens, a escala de cores representa a incerteza relacionada ao contato, de modo que cores azuis representam baixa incerteza e cores avermelhas alta incerteza. ....66

Figura 4-21: A figura exhibe as realizações 0, 5, 10 e 15 da zona de incerteza de 0,85 obtidas na simulação das distâncias assinaladas. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....69

Figura 4-22: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 0 dos estéreis na cor azul. As regiões demarcadas em cada realização demonstram a variabilidade obtida na simulação. Note a presença ou ausência de blocos na região demarcada de acordo com a realização. ....70

Figura 4-23: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e 15 da categoria 1 da hematita na cor azul claro. As regiões demarcadas em cada realização demonstram a variabilidade obtida na simulação. Note a presença ou ausência de blocos na região demarcada de acordo com a realização. ....71

Figura 4-24: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 2 da canga superficial na cor amarela. As regiões demarcadas em cada realização demonstram a variabilidade obtida na simulação, note a diferença da quantidade de blocos e o tamanho do domínio. ....72

Figura 4-25: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e 15 da categoria 3 dos jaspelitos na cor vermelha. As regiões demarcadas em cada realização demonstram a variabilidade obtida na simulação. Note a presença ou ausência de blocos na região demarcada de acordo com a realização. ....73

Figura 4-26: A imagem apresenta a proporção das 20 realizações obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência Lito4. Na imagem, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....75

Figura 4-27: A imagem apresenta as seções verticais da realização 5 evidenciando que os dados foram honrados na simulação das distâncias assinaladas. Seções leste-oeste nos cortes 60, 120 e 180 do modelo de blocos de A a C, e seções norte-sul nos cortes 100 e 300 do modelo de blocos em D e E. Note nas regiões demarcadas 1 e 2, que os dados provenientes de furos de sondagem foram honrados durante a simulação. A região demarcada 3 demonstra que os dados provenientes de seções geológicas acrescentadas ao banco de dados foram respeitados. Note, que na região 4, os centroides de cada bloco coincidem com os dados provenientes de seções geológicas, e na região 5 a presença do furo de sondagem em que os dados foram honrados na realização apresentada. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....76

Figura 4-28: A figura exhibe a validação dos variogramas nas três direções principais da função distâncias  $RT_0$ . A cor verde representa as realizações obtidas na simulação e a cor vermelha o variograma das distâncias assinaladas. Note que o objetivo da validação foi verificar se a continuidade espacial é reproduzida nas realizações a pequenas e a médias distâncias .....77

Figura 4-29: A figura exibe a validação dos variograma nas três direções principais da função distâncias RT\_1. A cor verde representa as realizações obtidas na simulação e a cor vermelha o variograma das distâncias assinaladas. Note que o objetivo da validação foi verificar se a continuidade espacial é reproduzida nas realizações a pequenas e a médias distâncias .....78

Figura 4-30: A figura exibe a validação dos variograma nas três direções principais da função distâncias RT\_2. A cor verde representa as realizações obtidas na simulação e a cor vermelha o variograma das distâncias assinaladas. Note que o objetivo da validação foi verificar se a continuidade espacial é reproduzida nas realizações a pequenas e a médias distâncias. ....79

Figura 4-31: A figura exibe a validação dos variograma nas três direções principais da função distâncias RT\_3. A cor verde representa as realizações obtidas na simulação e a cor vermelha o variograma das distâncias assinaladas. Note que o objetivo da validação foi verificar se a continuidade espacial é reproduzida nas realizações a pequenas e a médias distâncias. ....80

Figura 4-32: A imagem do canto esquerdo superior apresenta a divisão hierárquica do banco de dados S11D utilizada na construção das realizações pelo o modelo SD-C. As demais imagens apresentam os conjuntos de dados construídos a partir da abordagem hierárquica. A imagem do canto direito superior apresenta o histograma do grupo I, a imagem do canto direito inferior o histograma do grupo II e a imagem do canto esquerdo inferior o histograma do grupo III. ....81

Figura 4-33: A figura exibe as distâncias assinaladas calculadas para cada categoria e modificadas pelo parâmetro C. Em A, as distâncias assinaladas para o grupo I. Em B, as distâncias assinaladas para o grupo II. Em C e D, as distâncias assinaladas para o grupo III. A escala de cores de cores está associada a distância de um tipo categórico ao tipo categórico distinto, as cores escuras representam valores baixos os quais pertencem ao domínio de interesse enquanto as cores vermelhas e quentes representam valores positivos, ou seja, regiões externas ao domínio de interesse. .82

Figura 4-34: A figura apresenta os histogramas dos valores interpolados das funções distância. A imagem A refere ao histograma da interpolação do grupo I. A imagem B refere ao histograma da interpolação do grupo II. A imagem C refere ao histograma da interpolação do grupo III. ....84

Figura 4-35: A figura exibe os resultados da krigagem ordinária das funções distâncias para cada grupo. A imagem A refere a interpolação do grupo I. A imagem B refere a interpolação do grupo II. A imagem C refere a interpolação do grupo III. A escala de cores está associada aos valores da função distância modificada interpolados para cada local do grid, valores negativos menores que  $-C$  pertencem ao domínio e valores positivos maiores que  $+C$  externos ao domínio. A região que reúne os valores entre  $-C$  e  $+C$  será determinada como zona de incerteza. ....85

Figura 4-36: A figura apresenta as zonas de incertezas obtidas para cada conjunto de dados. Zona de incerteza para o grupo I em A. Zona de incerteza para o grupo II em B. Zona de incerteza para o grupo III em C. As cores de cada imagem estão associadas aos valores entre  $-C$  e  $+C$  que determinam a zona de incerteza. ....86

Figura 4-37: A imagem exibe as regras estabelecidas para a construção dos modelos geológicos. ....88

Figura 4-38: A figura retrata a realização 2 obtida na simulação não condicional das zonas de incerteza. Zona de incerteza para o grupo I em A. Zona de incerteza para o



grupo II em B. e Zona de incerteza para o grupo III em C. A escala de cores está associada aos valores obtidos na realização 2 da simulação não condicional de cada zona de incerteza. ....	89
Figura 4-39: A figura exhibe as zonas de incerteza classificadas a partir da comparação das simulações e as interpolações em cada zona de incerteza. A escala de cores representa se um determinado local pertence ou não ao domínio de interesse, caso o local pertença ao domínio o mesmo recebe a cor vermelha, caso contrário recebe a cor azul. ....	90
Figura 4-40: A figura exhibe as realizações 0, 5, 10 e 15 do modelo geológico. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	91
Figura 4-41: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 0 dos estéreis na cor azul escura. Note a presença de blocos isolados e dispersos em 1. Variabilidade entre modelos representada em 2. ....	92
Figura 4-42: A imagem apresenta as realizações 0, 5, 10 e 15 da categoria 1 da hematita na cor azul clara. A região do círculo demonstra a variabilidade entre modelos obtida na simulação. ....	93
Figura 4-43: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 2 da canga superficial na cor amarela. A região demarcada demonstra a variabilidade entre modelos obtida na simulação. ....	94
Figura 4-44: A imagem apresenta as realizações 0, 5, 10 e 15 da categoria 3 dos jaspelitos na cor vermelha. Na região demarcada fica evidente a variabilidade entre realizações obtida na simulação. ....	95
Figura 4-45: Proporção das categorias nas 20 realizações obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência. Na imagem, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	96
Figura 4-46: A imagem apresenta as seções verticais da realização 5, evidenciando que os dados foram honrados na simulação. Da direita para a esquerda, nas seções leste-oeste de A à C, e nas seções norte-sul em D e E. Note nas regiões demarcadas 1 e 2, que os dados provenientes de furos de sondagem foram honrados durante a simulação. A região demarcada 3 demonstra que os dados provenientes de seções geológicas acrescentadas ao banco de dados foram respeitados. Na região 4, os centroides de cada bloco coincidem com os dados provenientes de seções geológicas, e na região 5 a presença do furo de sondagem em que os dados foram honrados na realização apresentada. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	97
Figura 4-47: O gráfico da imagem apresenta a variabilidade obtida a partir da diferença do maior e do menor volume dos domínios obtidos para cada categoria pelo método <i>contactsim</i> . No gráfico, os estéreis são representados em 1, a hematita em 2, a canga superficial em 3 e os jaspelitos em 4. ....	98
Figura 4-48: O gráfico da imagem apresenta a variabilidade obtida a partir da diferença do maior e do menor volume dos domínios obtidos para cada categoria pelo método	

SD Sim. No gráfico os estéreis são representados em 1, a hematita em 2, a canga superficial em 3 e os jaspelitos em 4.....	99
Figura 4-49: O gráfico da imagem apresenta a variabilidade obtida a partir da diferença do maior e do menor volume dos domínios obtidos para cada categoria pelo método SD-C. No gráfico os estéreis são representados em 1, a hematita em 2, a canga superficial em 3 e os jaspelitos em 4.....	100
Figura 4-50: A figura exhibe os mapas de probabilidade da categoria 0 referentes aos estéreis. A região demarcada demonstra a diferença entre metodologias. Note a ausência da falha preenchida por intrusivas na metodologia SD Sim. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência.....	101
Figura 4-51: A figura exhibe os mapas de probabilidade da categoria 1 referentes da hematita. A região demarcada demonstra a diferença entre metodologias. Note que no <i>contactsim</i> , existe alta probabilidade de ocorrência da litologia na região superficial. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência.....	102
Figura 4-52: A figura exhibe os mapas de probabilidade da categoria 2 referentes a canga superficial. Note, na região demarcada, a diferença entre metodologias, em especial para a metodologia <i>contactsim</i> que apresenta grande variabilidade para essa litologia. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência.....	103
Figura 4-53: A figura exhibe os mapas de probabilidade da categoria 3 referentes dos jaspelitos. A região demarcada demonstra a diferença entre metodologias. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência. ....	104
Figura 4-54: A imagem apresenta a comparação entre seções em Y corte 120. Em A, o modelo de referência Lito4, em B a realização 0 do <i>contactsim</i> , em C a realização 0 do SD Sim e em D a realização 0 do SD-C. Nas seções, a cor verde representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.....	105
Figura 4-55: A imagem apresenta a comparação entre seções em Y corte 180. Em A, o modelo de referência Lito4, em B a realização 0 do <i>contactsim</i> , em C a realização 0 do SD Sim e em D a realização 0 do SD-C. Nas seções, a cor verde representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.....	106
Figura 4-56: A imagem acima exhibe a comparação entre seções em X corte 300. Em A, o modelo de referência Lito4, em B a realização 0 do <i>contactsim</i> , em C a realização 0 do SD Sim e em D a realização 0 do SD-C. Nas seções, a cor verde representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.....	107
Figura 4-57: A imagem exhibe a divisão hierárquica do banco de dados S11D para o modelo final.....	107
Figura 4-58: A figura apresenta as distâncias assinaladas calculadas para cada categoria. Em A, as distâncias assinaladas para o grupo I. Em B, as distâncias assinaladas para o grupo II. Em C, as distâncias assinaladas para o grupo III. Em D e	

E, as distâncias assinaladas para o grupo IV. A escala de cores de cores está associada a distância de um tipo categórico ao tipo categórico distinto, as cores escuras representam valores baixos os quais pertencem ao domínio de interesse, enquanto as cores vermelhas e quentes representam valores positivos, ou seja, regiões externas ao domínio de interesse..... 109

Figura 4-59: A figura apresenta os histogramas dos valores obtidos com krigagem ordinária das funções distâncias para cada grupo. A imagem A representa o histograma da interpolação do grupo I. A imagem B representa o histograma da interpolação do grupo II. A imagem C representa o histograma da interpolação do grupo III. A imagem D representa o histograma da interpolação do grupo IV..... 111

Figura 4-60: Modelos obtidos por krigagem ordinária das funções distâncias para cada grupo. A imagem A representa a interpolação do grupo I. A imagem B representa a interpolação do grupo II. A imagem C representa a interpolação do grupo III. A imagem D representa a interpolação do grupo IV. A escala de cores está associada aos valores da função distância modificados interpolados para cada local do grid, valores negativos menores que  $-C$  pertencem ao domínio e valores positivos maiores que  $+C$  externos ao domínio. A região que reúne os valores entre  $-C$  e  $+C$  será determinada como zona de incerteza..... 112

Figura 4-61: A figura apresenta as zonas de incertezas obtidas para cada conjunto de dados. Zona de incerteza para o grupo I em A. Zona de incerteza para o grupo II em B. Zona de incerteza para o grupo III em C. Zona de incerteza para o grupo IV em D. As cores de cada imagem estão associadas aos valores entre  $-C$  e  $+C$  que determinam a zona de incerteza. .... 113

Figura 4-62: A figura apresenta as zonas de incerteza simuladas na parte esquerda e as zonas de incerteza classificadas na parte direita. As imagens A, C, E e G representam a realização 82 da simulação de cada zona de incerteza. A escala de cores destas imagens está associada aos valores obtidos na realização da simulação não condicional de cada zona de incerteza. As imagens B, D, F e H apresentam a classificação das zonas de incerteza. As zonas de incerteza estão ordenadas de cima para baixo e representam cada um dos grupos de dados. A escala de cores representa se um determinado local pertence ou não ao domínio de interesse, caso o local pertença ao domínio o mesmo recebe a cor vermelha, caso contrário recebe a cor azul..... 114

Figura 4-63: A figura apresenta as regras estabelecidas para a construção das realizações dos modelos..... 115

Figura 4-64: A figura exhibe modelos construídos a partir de diferentes regras. Modelo e seção construídos ao considerar os estéreis e intrusivas como categoria 0 em A e B, e modelo e seção obtidos ao classificar os estéreis e as intrusivas em categorias distintas é apresentado em C e D. Note a falha preenchida por intrusivas presente nas regiões demarcadas 1, 2 e 3 no modelo classificado separadamente e a incorporação da intrusiva aos estéreis no modelo classificado em conjunto. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias. Nas imagens A e B a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. Nas imagens C e D a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor verde a categoria 2 da canga

superficial, a cor laranja a categoria 3 dos jaspelitos e a cor vermelha representa a falha preenchida por intrusivas.....	116
Figura 4-65: A imagem apresenta as realizações 4, 66, 79 e 82 da categoria 0 dos estéreis na cor azul. Note a presença da falha preenchida por intrusivas na região demarcada pelo círculo e a variabilidade desta região. ....	117
Figura 4-66: A imagem apresenta as realizações 4, 66,79 e 82 da categoria 1 da hematita em azul claro. A região do círculo demonstra a variabilidade entre modelos obtida na simulação. ....	118
Figura 4-67: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 2 da canga superficial em amarelo. A região demarcada demonstra a variabilidade entre modelos obtida na simulação. ....	119
Figura 4-68: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e15 da categoria 3 dos jaspelitos na cor vermelha. Na região demarcada, fica evidente a variabilidade entre realizações obtida na simulação. Note, na região demarcada, da ausência de blocos de jaspelitos devido a presença da intrusiva dos estéreis.....	120
Figura 4-69: A imagem apresenta as realizações 4, 66, 79 e 82 para o modelo geológico final. Note a variabilidade apresentada em 1 obtida pela simulação independente da região da falha. A região demarcada em 2 demonstra a variabilidade da hematita e do jaspelitos entre realizações. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	121
Figura 4-70: A figura apresenta as seções verticais da realização 82 evidenciando que os dados foram honrados na simulação. Da direita para a esquerda nas seções leste-oeste de A a C, e nas seções norte-sul em D e E. Note, nas regiões demarcadas 1, que os dados provenientes de furos de sondagem foram honrados durante a simulação. A região demarcada 2 demostra que os dados provenientes de seções geológicas acrescentadas ao banco de dados foram respeitados. A região 3 mostra, que na realização apresentada, os dados de intrusivas foram honrados. Nas regiões 4 e 5, os centroides de cada bloco coincidem com os dados provenientes de seções geológicas e os dados de furos de sondagem foram respeitados. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.....	123
Figura 4-71: A figura exhibe a proporção das primeiras 50 realizações obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência. Na imagem, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	124
Figura 4-72: A figura exhibe a proporção das 50 realizações restantes obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência. Na imagem, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. ....	124
Figura 4-73: O gráfico da imagem apresenta a variabilidade obtida a partir da diferença do maior e do menor volume dos domínios obtidos para cada categoria pelo método	

final. No gráfico, os estéreis são representados em 1, a hematita em 2, a canga superficial em 3 e os jaspelitos em 4..... 125

Figura 4-74: A figura exibe os modelos de probabilidade de cada categoria das realizações obtidas na simulação. Em A, o modelo dos estéreis, em B o modelo da hematita, em C o modelo da canga e em D o modelo do jaspelito. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência. .... 126

Figura 4-75: A imagem apresenta a comparação entre seções em Y. Para cada corte, a seção superior representa modelo de referência Lito4 e a seção inferior os cortes da realização 82. Nas seções, a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. .... 128

Figura 4-76: A imagem apresenta a comparação entre seções em X. Na região esquerda, são apresentados os cortes do modelo de referência Lito4 e na esquerda os cortes da realização 82. Nas seções, a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos..... 128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Grid do modelo geológico base.....	44
Tabela 4-2: Propriedades do grid de simulação.....	51
Tabela 4-3: Resumo dos modelos adotados para a variografia das distâncias assinaladas. ....	62
Tabela 4-4: Parâmetros da interpolação das distâncias assinaladas.....	63
Tabela 4-5: Propriedades do grid de simulação.....	67
Tabela 4-6: Proporção da zona de incerteza e o grid de simulação.....	67
Tabela 4-7: Parâmetros de simulação.....	67
Tabela 4-8: Resumo da continuidade espacial dos conjuntos de dados.....	83
Tabela 4-9: Parâmetros de busca usados na krigagem das distâncias. ....	84
Tabela 4-10: Parâmetros de continuidade espacial utilizados na simulação não-condicional. ....	87
Tabela 4-11: Resumo da continuidade espacial dos conjuntos de dados.....	110
Tabela 4-12: Parâmetros de busca utilizados na interpolação das distâncias. ....	111
Tabela 4-13: Parâmetros de continuidade espacial utilizados na simulação não-condicional. ....	114

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Meta .....	4
1.2 Objetivos específicos .....	4
1.3 Organização da dissertação.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Variáveis Regionalizadas .....	6
2.1.1. Funções aleatórias .....	6
2.1.2. Momentos e estacionalidade .....	7
2.1.3. Decisão de estacionaridade .....	8
2.2 Modelos Determinísticos .....	9
2.2.1. Modelos Explícitos .....	9
2.2.2. Modelos Implícitos .....	10
2.2.3. Abordagem Hierárquica .....	13
2.3 Modelos estocásticos .....	14
2.3.1. Simulação Sequencial Gaussiana .....	16
2.3.2. Simulação por Bandas Rotativas .....	17
2.3.3. Simulação Multipontos .....	19
3. MODELOS GEOLÓGICOS ESTOCÁSTICOS .....	22
3.1 Geoestatística Multipontos .....	23
3.1.1. Árvore de busca .....	24
3.1.2. Algoritmo <i>contactsim</i> .....	27
3.2 Modelagem Implícita .....	29
3.2.1. Algoritmo distâncias assinaladas.....	29
3.2.2. Incerteza associada ao modelo implícito .....	32
3.3 Plug-in: <i>DFMOD C</i> .....	38
3.3.1. <i>Signed Distance C</i> .....	39
3.3.2. <i>Classifier C</i> .....	40
4. ESTUDOS DE CASO.....	43
4.1 Banco de dados .....	43
4.2 <i>Contactsim</i> (MPS).....	47
4.3 Modelos implícitos.....	59
4.3.1. Simulação da função distância (SD sim.).....	59

4.3.2. Parâmetro C para múltiplas realizações (SD-C) .....	81
4.4 Comparação entre modelos .....	97
4.5 Modelo final .....	107
4.5.1 Distâncias assinaladas .....	108
4.5.2 Continuidade Espacial .....	110
4.5.3 Interpolação das distâncias e região de incerteza .....	110
4.5.4 Simulação .....	113
4.5.5 Pós-processamento e validações .....	122
4.6 Discussões .....	129
4.6.1 <i>Contactsim</i> (MPS).....	129
4.6.2 SD Sim .....	130
4.6.3 SD –C .....	131
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	133
5.1 Recomendações para trabalhos futuros.....	134
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	136
APÊNDICES.....	142
Apêndice A – Algoritmo Signed Distance C.....	143
Apêndice B – Algoritmo Classifier C .....	146
Apêndice C – Algoritmo Hierarchical Union .....	152



## 1. INTRODUÇÃO

O modelo geológico é a principal ferramenta utilizada para avaliar depósitos minerais e a viabilidade de um empreendimento mineral. Compreender os processos geológicos de formação do depósito e traduzir essa informação em um modelo é essencial para o planejamento da produção e a tomada de decisões a respeito da tecnologia e os recursos a empregados no empreendimento. Cada unidade geológica em subsuperfície é um volume irregular com características distintas, marcadas pelos limites ou contatos entre unidades. Estes contatos são determinados por descontinuidades complexas geradas por erosões, falhas e diferentes processos deposicionais. Existe incerteza na determinação dos limites em subsuperfície, o que impacta na quantidade e qualidade do bem mineral de interesse, bem como a sua localização. A informação sobre volume e teor devem ser confiáveis para o sucesso do empreendimento, desta forma a incerteza dos modelos deve ser avaliada.

O empreendimento mineral é dividido em várias etapas complementares e progressivas, sendo as principais: estimativa ou avaliação de recursos, mineração, planejamento de mina, processamento e controle de teores e comercialização. Dentre elas, a avaliação, usualmente, divide o material de interesse em recursos e reservas, na qual os recursos são calculados dentro de domínios estabelecidos considerando um conjunto de fatores técnicos e econômicos, e a parte que apresenta viabilidade técnica e econômica é denominado de reserva mineral (Sinclair & Blackwell, 2011).

Informações geológicas são obtidas a fim de compreender a gênese do depósito e o controle da mineralização. A última é relevante para a avaliação de recursos minerais, já que permitem definir os domínios da estimativa. Esta delimitação é crucial na avaliação de recursos, já que as concentrações e volumes de diferentes elementos ou minerais são determinados dentro desses domínios.

Os domínios da estimativa, equivalentes as zonas estacionárias geoestatísticas, podem ser definidos como o volume de rocha no qual os controles mineralógicos atuam de modo semelhante, o que resulta em distribuições homogêneas (Rossi e Deutsch, 2013). Domínios geológicos e os domínios da estimativa diferem na definição de seus limites, enquanto domínios geológicos são definidos a partir de controles mineralógicos e estruturais relacionados a gênese do depósito mineral, já domínios da estimativa são estabelecidos a partir da definição de estacionalidade.

O processo de construção do modelo tridimensional dos domínios começa com a interpretação do depósito mineral, o estudo dos conceitos geológicos de formação e integração com os dados obtidos. O modelo geológico é gerado tradicionalmente de modo explícito, a partir de seções geológicas interpretadas e mapas de superfície. Os diferentes domínios são digitalizados em um processo manual lento e laborioso, que dificulta a atualização do modelo considerando novas informações. Tal método, apesar de exprimir no modelo o julgamento e a experiência do especialista em modelos geológicos, cria um único modelo subjetivo e não permite a sua reprodução (Silva, 2015). Esse processo, por ser subjetivo, afeta a delimitação

do formato e o volume dos domínios geológicos, principalmente nos casos onde a informação é escassa.

Os métodos implícitos surgiram para substituir a digitação manual por procedimentos automáticos e solucionar determinadas desvantagens dos métodos tradicionais. Têm como finalidade criar uma representação matemática contínua de um atributo em um dado volume. São construídos grids, a partir da interpolação espacial dos dados amostrais, em um modelo. Após a construção dos modelos, destes são extraídas superfícies como finitas aproximações de superfícies com infinito detalhe (Cowan *et al.*, 2003). As superfícies são comumente extraídas para uso em modelos geológicos em uma malha triangular, wireframe ou modelo de blocos.

A família de métodos implícitos pode ser subdividida em métodos determinísticos, nos quais apenas um único modelo é obtido, e métodos estocásticos que possibilitam a construção de múltiplos cenários possíveis para o depósito mineral. A Figura 1-1, em seu lado esquerdo, exibe a representação de um modelo determinístico e, no lado direito, aponta a comparação de três modelos estocásticos que tornam evidente a variabilidade volumétrica possível dada a informação presente.

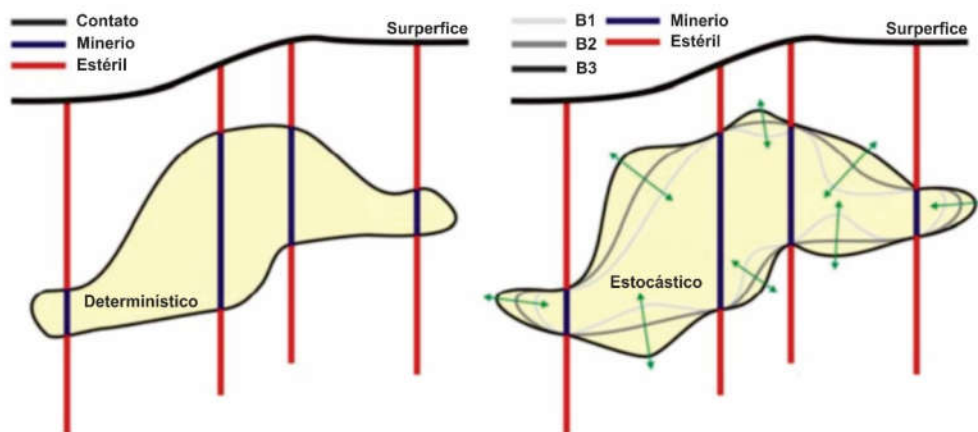


Figura 1-1: Esquema em 2D ilustrando um modelo determinísticos à esquerda com modelos implícitos estocásticos à direita. Os modelos implícitos estocásticos permitem acessar a incerteza volumétrica total ao variar o local dos contatos entre os furos de sondagem (Modificado de McLennan e Deutsch 2006).

As técnicas implícitas determinísticas produzem modelos diretos e rápidos, que surgem da necessidade de reduzir o tempo exigido para a construção de modelos e facilitar a incorporação de novas informações. Os principais métodos dessa categoria são a interpolação suavizada discreta (Mallet, 2002), o método dos campos potenciais (Chilés *et al.*, 2004; Calcagno *et al.*, 2008; Renard *et al.*, 2013) e a interpolação por funções básicas radiais ou RBF (Cowan *et al.*, 2002; Cowan *et al.*, 2003).

A baixa quantidade de informações disponível impede a localização exata do contato, que é desconhecido em toda a sua extensão, o qual podemos definir como

incerteza dos contatos geológicos e nos métodos determinísticos essa incerteza não é avaliada.

Técnicas estocásticas baseadas em simulação geoestatística bi-pontos, como a simulação de indicadores e simulação gaussiana truncada (Journel, A. G. 1989; Matheron, G. *et al* 1987), permitem acessar a incerteza relacionada ao modelo geológico. Essas técnicas, que demandam grande esforço computacional, foram desenvolvidas para construir múltiplas realizações de todo o domínio geológico.

A simulação multipontos (MPS), por sua vez, utiliza dados de imagens de treinamento para construir a probabilidade condicional e gerar múltiplos cenários de domínios geológicos. Cada cenário visa a reprodução das características geológicas das imagens de treinamento. O método foi proposto inicialmente por Guardiano e Srivastava (1993), mas diversas variações e métodos foram desenvolvidos baseados no método inicial, como o algoritmo *snessim* desenvolvido por Strebelle e Journel (2001) e o método proposto por Silva e Deutsch (2012b) que utiliza múltiplas imagens de treinamento. Com o objetivo de acessar a incerteza de contatos, Boucher *et al.* (2014) propuseram o algoritmo *contactsim* que permite perturbar os contatos entre domínios em uma zona obtida a partir de um modelo de referência. Embora eficiente, o método demanda modelos conceituais ou imagens de treinamento realísticas, que demandam esforço para sua geração.

A função distância assinalada é utilizada para gerar modelos implícitos, ao calcular a distância euclidiana entre uma certa amostra e a amostra mais próxima de um tipo indicador distinto. Esses valores são interpolados em locais não amostrados, sendo que valores positivos ou negativos para as distâncias determinam se um local não pertence, em caso positivo, ou se pertence, em caso negativo, a um determinado domínio. O método tem como objetivo gerar domínios binários nos quais o contato é definido em locais de valor zero para as distâncias. Silva e Deutsch (2012a) apresentaram uma extensão desta técnica para múltiplos domínios geológicos.

A modelagem por distâncias assinaladas pode ser modificada para avaliar a incerteza dos contatos geológicos. Cárceres *et al.* (2011) apresenta a metodologia por meio da qual é transformado o valor das distâncias em distribuições normais e simuladas condicionalmente as amostras, sendo as realizações truncadas nos locais de distância igual a zero, o que resulta na variabilidade dos contatos. Já Wild e Deutsch (2011) propuseram a calibração de um parâmetro C para gerar uma banda de incerteza. No interior dessa região, são simulados valores uniformes que, posteriormente, são comparados com valores interpolados. Como resultado, são construídas múltiplas realizações equiprováveis do modelo geológico.

A incerteza associada ao modelo geológico está relacionada à transição entre litologias. Tal incerteza impacta diretamente no volume a ser estimado na avaliação de recursos, e a diferença entre a estimativa e o valor recuperado tem impacto significativo na lucratividade do empreendimento mineiro. Este trabalho busca investigar diversas metodologias utilizadas para modelar a incerteza entre domínios geológicos, aplicando-as a um caso real de um depósito de minério de ferro.

## 1.1 Meta

A presente dissertação tem como meta a avaliação de três métodos de modelagem estocástica que possam ser usados para determinar a incerteza dos contatos geológicos: *contactsim*, simulação da função distância e o parâmetro C da incerteza. Os métodos são ilustrados por meio de um estudo de caso em um depósito de minério de ferro localizado no estado do Pará.

## 1.2 Objetivos específicos

A fim de atingir a meta proposta os seguintes objetivos foram delineados:

1. Desenvolver uma metodologia para definir a incerteza dos contatos geológicos.
2. Gerar zonas de incertezas e gerar contatos.
3. Analisar a sensibilidade dos tamanhos das zonas de incerteza.
4. Obter diversas realizações equiprováveis para os contatos litológicos.
5. Avaliar a incerteza geológica em relação a geometria e posição dos contatos em diferentes litologias.
6. Avaliar as metodologias propostas em um banco de dados real.
7. Avaliar a incerteza volumétrica dos contatos a partir da diferença entre limites dos domínios geológicos, para cada metodologia utilizada.

## 1.3 Organização da dissertação

A dissertação será organizada em cinco capítulos. O primeiro apresenta uma introdução ao tema modelamento de depósitos minerais e a incerteza associada aos domínios geológicos. Em seguida, são apresentadas a meta da dissertação, os objetivos específicos e a sequência metodológica adotada.

O segundo capítulo revisa os conceitos estacionaridade, domínios geológicos, modelos hierárquicos, simulação multipontos, métodos de modelagem implícita com funções distância assinaladas, bem como as técnicas de simulação baseadas no variograma: simulação sequencial gaussiana, simulação de indicadores e simulação por bandas rotativas.

O terceiro capítulo apresentará o arcabouço teórico das metodologias utilizadas para acessar a incerteza associada aos modelos.

O quarto capítulo discutirá os resultados das metodologias aplicadas a um banco de dados real referente a um depósito de ferro. Serão comparados os impactos da incerteza e a variabilidade dos modelos entre os métodos propostos, selecionado o método que melhor reproduz a estrutura geológica do modelo de referência.

O quinto capítulo apresentará as conclusões obtidas sobre o estudo de caso real e as sugestões possíveis para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os processos geológicos responsáveis pela formação de depósitos minerais apresentam diversos níveis de complexidade, e geram uma grande variedade litologias e estruturas com características físicas e químicas distintas. O desafio de avaliar estes depósitos, geralmente, é dividido em duas etapas principais: a delimitação de domínios geológicos; e a estimativa ou simulação das distribuições espaciais de determinados atributos dentro dos domínios estabelecidos.

Neste capítulo, será apresentado uma breve revisão bibliográfica dos métodos de modelagem geológica e ferramentas geoestatísticas relevantes para a construção destes modelos e de como pode ser feita a análise da incerteza associada a estes modelos.

### 2.1 Variáveis Regionalizadas

#### 2.1.1. Funções aleatórias

A geoestatística utiliza do conceito de variáveis regionalizadas na avaliação da distribuição espacial de uma ou mais variáveis. O conceito foi estabelecido por Matheron (1963) para enfatizar os dois principais aspectos deste tipo de variáveis: o aspecto aleatório, que corresponde as irregularidades locais, e o aspecto estrutural, que reflete as tendências de larga escala.

Segundo Journel e Huijbregts (1978), a definição de uma função aleatória (RF) expressa os aspectos de aleatoriedade e estruturação de uma variável regionalizada: no local  $u_i$  de um ponto  $Z(u_i)$  é considerado uma variável aleatória; o conjunto de  $Z(u)$ s também é uma função aleatória ao considerar que para cada par de pontos  $u_i$  e  $u_i + h$ , os valores aleatórios correspondentes  $Z(u_i)$  e  $Z(u_i + h)$  não são independentes, mas estão relacionados por uma correlação que expressa a estrutura espacial da variável regionalizada inicial  $Z(u)$ .

As variáveis aleatórias (RV) são variáveis, que correspondem a uma certa distribuição de probabilidade. A RF pode ser definida como um conjunto de valores aleatórios determinados sobre um campo de interesse  $\{Z(u), u \in \text{área de estudo } A\}$ , ou simplesmente  $Z(u)$ . Normalmente, a definição de uma RF é restrita a valores aleatórios relacionados ao mesmo atributo, como  $z$ , consequentemente outra RF seria definida para modelar a variabilidade espacial de um segundo atributo, como  $\{Y(u), u \in \text{área de estudo}\}$ .

Assim como uma variável aleatória,  $Z(u)$  é caracterizada pela sua função distribuição acumulada (fda), a função aleatória  $Z(u)$  é caracterizada pelo conjunto de todas as  $N$  funções de distribuições acumuladas das variáveis para qualquer número  $N$  e qualquer escolha dos  $N$  locais  $u_i, i = 1, \dots, N$  dentro da área de estudo  $A$ :

$$F(u_1, \dots, u_N; z_1, \dots, z_N) = Prob\{Z(u_1) \leq z_1, \dots, Z(u_N) \leq z_N\} \quad (2-1)$$

Da mesma forma que a distribuição univariada acumulada do valor aleatório  $Z(u)$  é utilizado para caracterizar a incerteza em relação ao valor  $z(u)$ , a distribuição

acumulada multivariada da equação 2-1 é utilizada para caracterizar a incerteza conjunta sobre os  $N$  valores  $z(u_1), \dots, z(u_N)$ .

### 2.1.2. Momentos e estacionalidade

Na geoestatística, apenas os dois primeiros momentos das funções aleatórias são utilizados, ou seja, nenhuma distinção é feita entre duas funções aleatórias  $Z_1(u)$  e  $Z_2(u)$  que apresentem os mesmos momentos de primeira e segunda ordem e ambas são consideradas ao compor o mesmo modelo (Journel e Huijbregts, 1978). O momento de primeira ordem corresponde a expectativa matemática, desta forma, se a função distribuição  $Z(u)$  possui uma expectativa, então essa expectativa em função de  $u$ , dada por:

$$E\{Z(u)\} = m(u) \quad (2-2)$$

Segundo Journel e Huijbregts (1978), os três momentos de segunda ordem considerados na geoestatística são: a variância, a covariância e o variograma. A variância a priori de  $Z(u)$ , quando existe, é definida como o momento de segunda ordem sobre a expectativa  $m(u)$  do RV  $Z(u)$ , ou seja:

$$Var\{Z(u)\} = E\{[Z(u) - m(u)]^2\} \quad (2-3)$$

Pode-se mostrar que, se duas funções aleatórias  $Z(u_1)$  e  $Z(u_2)$  possuem variâncias nos pontos  $u_1$  e  $u_2$ , então eles também apresentam covariância em função dos dois locais  $u_1$  e  $u_2$ , descrita como:

$$C(u_1 u_2) = E\{[Z(u_1) - m(u_1)][Z(u_1) - m(u_2)]\} \quad (2-4)$$

A função variograma é definida como a variância do incremento  $[Z(u_1) - Z(u_2)]$ , dada por:

$$2\gamma(u_1, u_2) = Var\{Z(u_1) - Z(u_2)\} \quad (2-5)$$

Em uma zona de mineralização homogênea, a correlação que existe entre dois valores de dados  $Z(u_k)$  e  $Z(u_{k'})$  não depende de suas posições particulares dentro da região, mas sim da distância que os separa (Journel e Huijbregts, 1978). Desta forma, as variáveis regionalizadas são divididas em três categorias:

- Estacionárias estritas: Uma função aleatória é estacionária, no sentido estrito, quando sua lei espacial é invariável sob translação. As duas componentes vetoriais  $\{Z(u_1), Z(u_k)\}$  e  $\{Z(u_1 + h), Z(u_k + h)\}$  têm a mesma lei de distribuição, independente do vetor de translação  $h$ .

- Estacionárias de segunda ordem: A função aleatória é dita estacionária de segunda ordem quando obedece a dois requisitos: (i) a esperança matemática  $E\{Z(u)\}$  existe e não depende do ponto suporte  $u$ ; (ii) para cada par de valores aleatórios  $\{Z(u), Z(u + h)\}$  a covariância exista e dependa da distância da separação  $h$ .

- Intrínsecas: A função aleatória é considerada intrínseca quando: a esperança matemática existe e não depende do suporte do ponto  $u$ , e para todos os vetores  $h$ , o incremento  $[Z(u + h) - Z(u)]$  tenha variância finita que não dependa de  $u$ .

### 2.1.3. Decisão de estacionaridade

A inferência geoestatística requer uma decisão de estacionaridade que implique na homogeneidade nos domínios geológicos escolhidos. Para que essa decisão seja considerada razoável, um total de cinco etapas de modelagem são realizadas: a primeira consiste na escolha do número e tipo de domínios para modelar as propriedades de interesse; a segunda em modelar os limites desses domínios; a terceira em quantificar a natureza das transições através dos limites; a quarta em quantificar tendências dentro dos limites; e a quinta e última etapa consiste em garantir que a tendência seja reproduzida na previsão (Mclennan, 2007).

Uma função aleatória estacionária (SRF) é uma representação probabilística de uma propriedade com valor esperado constante e momentos de covariância independentes da localização. Não é apropriado considerar todo o depósito mineral como um único domínio estacionário, modelado a partir de uma única SRF. Normalmente, é necessário identificar diferentes domínios no depósito, cada qual, com seu próprio modelo de SRF, consistente com as suposições matemáticas de uma SRF (Mclennan, 2007).

Segundo Mclennan (2007), considerando um domínio  $D$ , a representação da SRF de uma propriedade geológica  $Z$  dentro de  $D$  é a função aleatória construída a partir dos valores aleatórios  $\{Z(u)$  para todo  $u$  em  $D\}$  de modo que cada RV  $Z(u)$  apresente o mesmo valor de primeira ordem esperado  $m$  e cada par de RV separados aproximadamente por  $h$  ( $Z(u), Z(u + h)$ ) tenha a mesma covariância de segunda ordem  $C_Z(h)$ , apesar do local  $u$  dentro de  $D$ . Essa é uma decisão de estacionariedade, já que a escolha de diferentes tipos de domínio resultam em diferentes pressupostos matemáticos de homogeneidade.

A escolha de domínios é necessária para a maioria dos depósitos, a implementação de diferentes funções aleatórias estacionárias dentro de domínios determinados de acordo com os tipos de rochas predominantes e/ou o histórico de formação, muitas vezes apresenta nível razoável de homogeneidade para as premissas da SRF. A Figura 2-1 apresenta um exemplo de uma discordância entre xistos e grauvacas que podem exemplificar dois domínios com características distintas, e que justificariam a utilização de duas SRF diferentes para gerar modelos consistentes com a realidade. Entretanto, na maioria das vezes o contato geológico não ocorre de modo claro, sendo o contato transicional mais comum.





Figura 2-1: A formação rochosa acima mostra uma inconformidade angular entre xistos e metagrauvacas encontrada na costa de Portugal na Praia do Telheiro (Fonte: <http://www.geologyin.com/2015/01/amazing-angular-unconformity.html>).

## 2.2 Modelos Determinísticos

Um modelo geológico consiste na representação gráfica, de uma estrutura de dados reais mais complexas, como uma abstração de um objeto real de alta complexidade. A sua principal função é auxiliar na compreensão de estruturas do ambiente real, e detêm papel fundamental na previsibilidade da geometria, forma e composição, especialmente para objetos com formas muito irregulares.

Os modelos geológicos buscam representar o entendimento dos controles mineralógicos de um depósito mineral e caracterizar as suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. A definição de domínios geológicos se baseia na interpretação e análise de evidências obtidas na mineralização, tipo de rocha, alteração e arcabouço estrutural, para descrever os eventos geológicos de formação. A interpretação da continuidade espacial dos domínios geológicos a partir de informações categóricas é essencial na etapa de avaliação de recursos minerais ao definir a extensão, o formato e o volume do corpo geológico, o que influencia diretamente na estimativa de recursos. As formas geométricas e estruturas geológicas podem ser divididas em dois tipos de métodos principais: modelos explícitos e modelos implícitos.

### 2.2.1. Modelos Explícitos

Os métodos explícitos são amplamente utilizados na indústria mineral para a construção de modelos geológicos. Neles, seções verticais são modeladas em softwares, a partir da incorporação de dados geológicos de sondagem rotativa, mapas superficiais, perfis geológicos ou seções geofísicas. Em um nível de maior subjetividade, estes dados podem incluir a experiência e intuição do geólogo, advindos do seu conhecimento sobre o fenômeno (Houlding, 1994). A interação por triangulação entre seções gera polígonos que sintetizam áreas com os mesmos

atributos geológicos, os domínios geológicos. Ao unir cada polígono referente a domínios geológicos distintos é gerado o modelo em três dimensões.

A Figura 2-2 ilustra o fluxo de trabalho da modelagem explícita para apenas um domínio geológico. As seções geológicas são construídas através da interpretação das informações de sondagens, e então trianguladas gerando sólidos em três dimensões. Para a construção de um modelo completo, é necessário a digitalização de inúmeras seções geológicas de modo a formar polígonos consistentes nas três dimensões do depósito. Normalmente, são modelados múltiplos domínios e o processo deve ser repetido de modo hierarquizado. Essa digitalização manual aumenta a chance de inconsistência e sobreposição entre sólidos, além de demandar de muito tempo para a construção dos modelos.

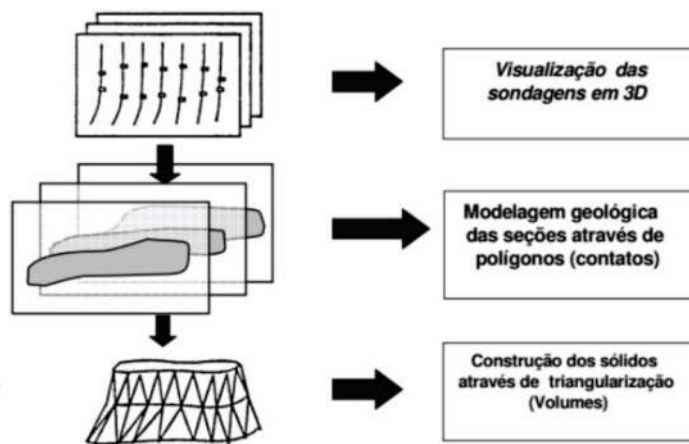


Figura 2-2: Modelagem geológica explícita (Modificado de Kavouras, 1995).

### 2.2.2. Modelos Implícitos

Nos métodos tradicionais explícitos, a construção de modelos é um processo extremamente demorado e subjetivo, ao produzir um modelo único a partir da interpretação individual do especialista. Essa característica impede a reprodução do modelo, o que em diversas situações, como em uma auditoria externa, se faz necessária.

Modelos implícitos são criados a partir de dados amostrais dispersos, geralmente categóricos. Uma função implícita ou modelo implícito fornece uma representação matemática contínua do atributo por todo o volume. Modelos implícitos contêm um número grande de isosuperfícies, sendo uma isosuperfície com dimensões finitas selecionada e extraída para determinar os contornos do modelo geológico. Geralmente, a superfície que apresenta valor zero é extraída.

#### *Funções implícitas*

As funções implícitas são utilizadas como base para alguns métodos de modelagem implícita. A construção de modelos implícitos foi introduzida no campo da

computação gráfica na construção de superfícies complexa por Bloomenthal e Bajaj (1997).

As funções implícitas são uma alternativa ao formalismo clássico  $f(x) = x$ . Na definição implícita, os múltiplos  $n$  argumentos e sua imagem são colocados no mesmo lado da equação na forma  $\Phi(x_1, \dots, x_n) = 0$ . Isso permite definir um contorno em 0 em  $n + 1$  dimensões em um espaço dimensional menor  $n$ . O contorno determina as regiões onde o sinal do valor da função implícita muda, isto é, negativo por dentro e positivo por fora (Silva, 2015).

Osher e Fedkiw (2003) demonstram a função implícita em uma dimensão espacial, a partir de linha segmentada em três pedaços pelos pontos  $x = -1$  e  $x = 1$ . Três subdomínios de interesse:  $(-\infty, 1)$ ,  $(-1, 1)$  e  $(1, \infty)$  em uma dada região são separados, sendo o primeiro e terceiro domínios partes da mesma região. São considerados  $\Omega^- = (-1, 1)$  como parte interna do domínio e  $\Omega^+ = (-1, 1) \cup (1, \infty)$  como parte externa ao domínio (Figura 2-3-A). A fronteira ou limite, entre interior e exterior, consiste nos dois pontos  $\partial\Omega = \{-1, 1\}$ , e é chamada de interface.

Para uma representação de interface explícita, os pontos que pertencem a interface são escritos explicitamente, como feito ao definir  $\partial\Omega = \{-1, 1\}$ . Entretanto, em uma representação implícita a interface é definida como um isocontorno de alguma função. Na Figura 2-3-B, está demonstrado o isocontorno  $\Phi(x) = x^2 - 1$  como conjunto de pontos em que  $\Phi(x) = 0$ .

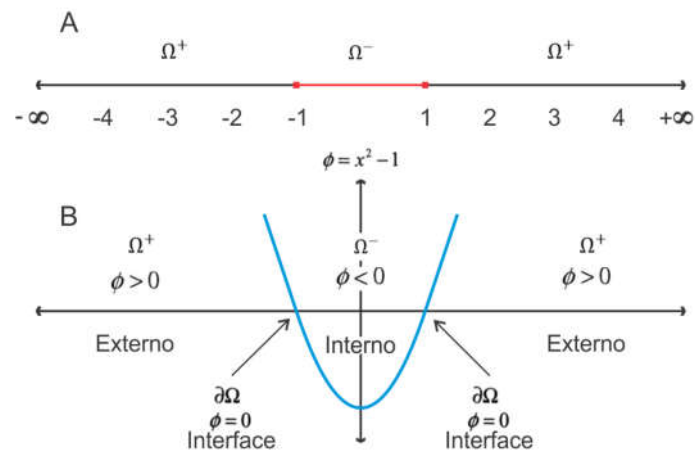


Figura 2-3: Em A está representada a linha dividida em três partes pelos pontos  $x=-1$  e  $x=1$ . B apresenta a função implícita  $\Phi(x) = x^2 - 1$  que define as regiões  $\Omega^-$  e  $\Omega^+$  e a interface  $\partial\Omega$ . (Modificado de Osher e Fedkiw, 2003)

O isocontorno  $\Phi(x) = 0$  foi selecionado para representar a interface de dimensão inferior, entretanto, não há nada especial sobre o isocontorno zero. Outras funções, com diferentes isocontornos podem ser adotados para atingir o mesmo resultado  $2\Omega = \{-1, 1\}$ , como por exemplo o isocontorno  $\hat{\Phi}(x) = 1$  da função  $\hat{\Phi}(x) = x^2$  (Osher e Fedkiw, 2003).

### Funções distâncias assinaladas

As funções distâncias assinaladas (SDF) foram propostas por Osher e Fedkiw (2003) como uma técnica de modelamento implícito na qual a função é construída pela interpolação da distância medida a partir dos dados condicionais. A separação entre dois tipos de rochas em relação umas às outras é medido pela função.

As SDF são funções implícitas  $\phi$  com  $|\phi(\vec{x})| = d(\vec{x})$  para todo  $\vec{x}$ . Portanto,  $\phi(\vec{x}) = d(\vec{x}) = 0$  para todo  $\vec{x} \in \partial\Omega$ ,  $\phi(\vec{x}) = -d(\vec{x})$  para todo  $\vec{x} \in -\Omega$  e  $\phi(\vec{x}) = d(\vec{x})$  para todo  $\vec{x} \in +\Omega$ . Essas funções dividem duas propriedades das funções implícitas. Na seção anterior, a função  $\phi(x) = x^2 - 1$  foi utilizada como representação implícita de  $\partial\Omega = \{-1, 1\}$ . Em uma representação de função distância assinalada estes pontos são  $\phi(x) = |x| - 1$ , como demonstrado na Figura 2-4. A função distância assinalada  $\phi(x) = |x| - 1$ , cria o mesmo limite ou interface  $\partial\Omega$ , com região interior  $-\Omega$  e região exterior  $+\Omega$ , que a função implícita.

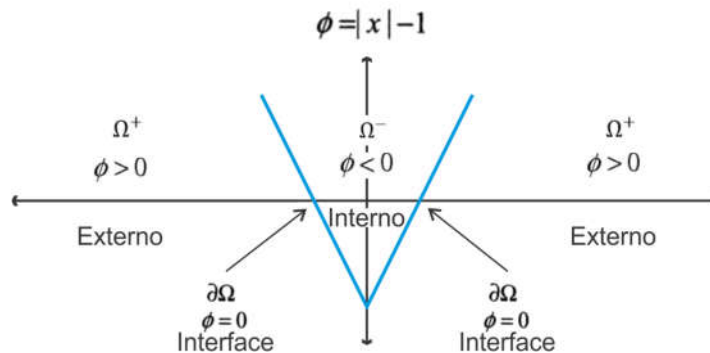


Figura 2-4: Função distância assinalada  $\phi(x) = |x| - 1$  que define as regiões  $\Omega^-$  e  $\Omega^+$  e a interface  $\partial\Omega$ . (Modificado de Osher e Fedkiw, 2003).

A Figura 2-5 ilustra o exemplo da metodologia em dados referentes a furos de sondagem, com o objetivo de distinguir entre minério e estéril. As amostras são codificadas de acordo com a distância do local da amostra e a amostra de tipo distinto mais próxima. O sinal da distância depende do tipo de rocha que está sendo considerado. Caso a localização pertença ao minério e a rocha distinta mais próxima seja estéril, o valor da distância é negativo, caso a localização pertença ao estéril e a rocha distinta mais próxima seja minério, o valor da distância é positivo.

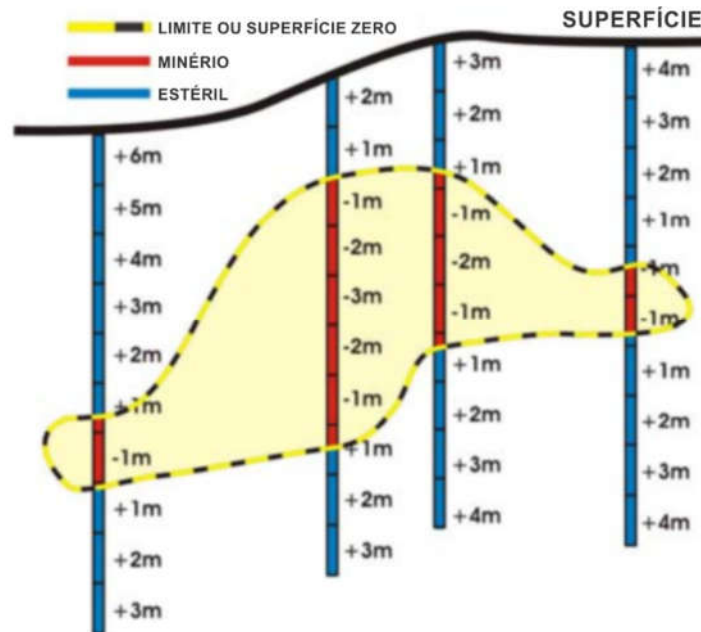


Figura 2-5: Metodologia funções distâncias assinaladas aplicada em dados de furos de sondagem. (Modificado de McLennan e Deutsch 2006)

### 2.2.3. Abordagem Hierárquica

Na delimitação dos domínios geológicos, não há limitação inerente às formas que podem ser modeladas. Eles podem ser combinados a partir de um conjunto de formas paramétricas predefinidas, ou, até mesmo, especificadas ou desenhadas livremente. As formas geológicas podem ser modeladas hierarquicamente. Assim, a forma de um objeto ou domínio pode ser usada em larga escala, e então, formas diferentes podem ser construídas para unidades geológicas internas de pequena escala. Segundo Pyrcz e Deutsch (2014), a escolha da subdivisão hierárquica para a modelagem tem uma influência significativa no modelo geológico final.

Normalmente, o modelo baseado em um esquema de hierarquia ou arquitetura específica pode incluir modelos aninhados com vários métodos de modelagem, transformações de coordenadas, modelos de tendência e modelos de continuidade espacial em cada escala (Pyrcz e Deutsch, 2014).

Na indústria do petróleo, diversas técnicas hierárquicas são utilizadas para modelar reservatórios petrolíferos. Xie *et al.* (2000) e Deutsch *et al.* (2001) introduziram métodos hierárquicos de simulação para modelagem de geometrias de reservatórios petrolíferos. Pyrcz *et al.* (2005) demonstraram métodos hierárquicos que imitam os processos geológicos de formação para determinar as geometrias dos modelos. Abrahamsen *et al.* (2007) desenvolveram métodos hierárquicos para aprimorar o condicionamento e restrição de geometrias referentes eventos deposicionais.

A Figura 2-6 apresenta a metodologia hierárquica para o modelamento de reservatórios petrolíferos apresentada por Pyrcz e Deutsch (2014). No modelo conceitual apresentado, as camadas do reservatório são separadas, e delas retirados

os complexos de canais fluviais. Cada um dos canais é separado do respectivo complexo, e posteriormente, realizadas as simulações estocásticas das propriedades petrofísicas de cada canal fluvial. O modelo é reagrupado respeitando a hierarquia estabelecida: cada canal simulado, retorna para o respectivo complexo de canais, e cada complexo retorna para sua camada do reservatório. O modelo final hierárquico apresenta todas as camadas iniciais propostas e cada canal fluvial simulado individualmente.

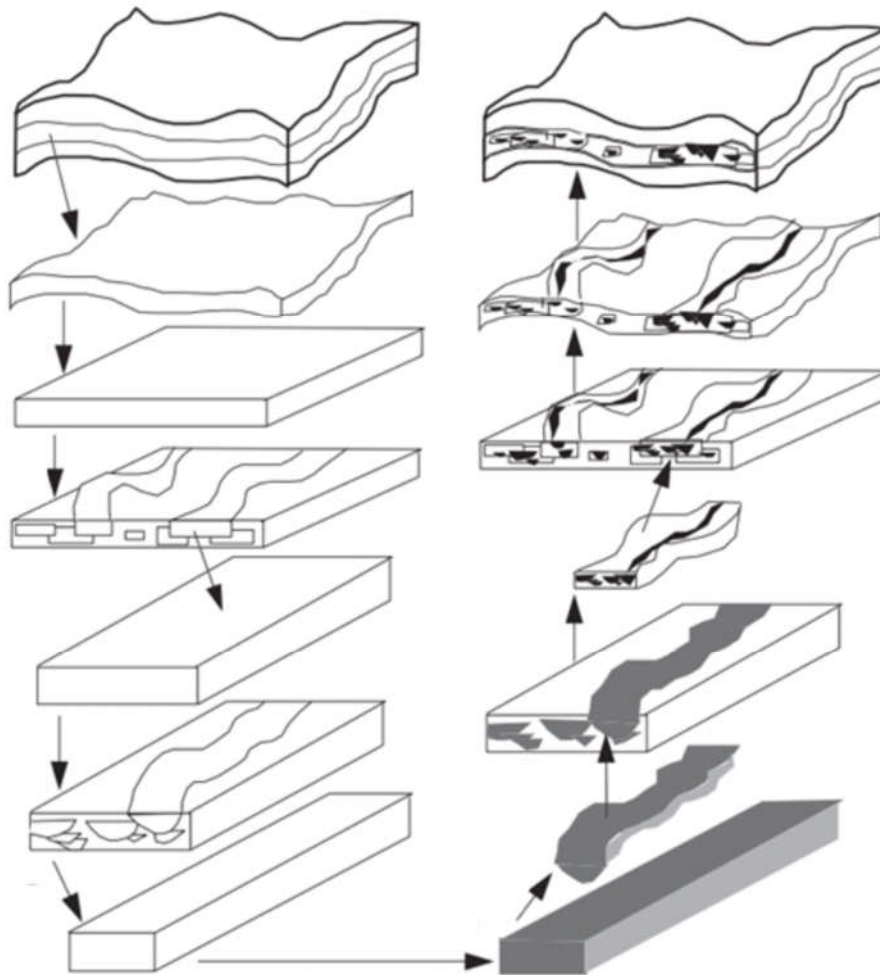


Figura 2-6: Abordagem conceitual para modelagem hierárquica. (Modificado de Pyrcz e Deutsch, 2014)

### 2.3 Modelos estocásticos

A incerteza está presente em diversos aspectos do estudo geológico e na engenharia. Ela é causada devido o entendimento incompleto a respeito de algo que se deseja quantificar. A incerteza não pode ser medida objetivamente como se avalia um litotipo ou uma elevação, sendo necessário se basear em modelos para avaliar a incerteza. A extensão espacial de um domínio estacionário é delimitada pelos contatos que indicam a transição entre domínios distintos, existe incerteza ao delimitar a localização destes limites. A incerteza de modelos geológicos deve ser acessada, e

os modelos espaciais estocásticos permitem avaliar essa incerteza. Desta forma, para avaliar a incerteza espacial são utilizados dos métodos de simulação geoestatística.

A simulação não-condicional de uma função randômica  $Z(u): u \in \mathfrak{R}^n$  é simplesmente a seleção aleatória de uma realização de  $Z(u)$  dentre todas as possíveis realizações. Para isso, é necessário conhecer, no mínimo implicitamente, a distribuição espacial da RF  $Z(u)$ . Entretanto, conhecer a distribuição espacial de  $Z(u)$ , não garante que a simulação represente a realidade, já que neste processo os valores simulados nos pontos amostrais não são necessariamente honrados. Desta forma, as simulações não condicionais são a realização de uma RF  $S(u)$  escolhida dentre todas as funções randômicas com a mesmo momento de segunda ordem que  $Z(u)$ , ou seja, a mesma covariância, variograma ou covariância generalizada (Chiles e Delfiner, 1999).

As funções randômicas  $S(u)$  possuem um número finito de realizações, dentre elas, algumas assumem valores iguais nos locais amostrados aos observados nas amostras, representando melhor a variável regionalizada  $Z(u)$ . Essas simulações, ditas condicionais, são realizações selecionadas aleatoriamente de um subgrupo de realizações que correspondem aos pontos amostrais (Chiles e Delfiner, 1999). Os modelos simulados condicionalmente devem honrar os valores dos pontos amostrados e reproduzir as características de dispersão dos dados originais como a variabilidade e a distribuição espacial, construindo cenários análogos a realidade da variabilidade espacial (Souza, 2002).

As simulações condicionais caem no escopo dos chamados métodos de Monte Carlo, elas não são nada mais que simulações de Monte Carlo espacialmente consistentes. O seu objetivo não é reproduzir os mecanismos genéticos que geraram o fenômeno observado, mas simplesmente imitar variações espaciais tão realisticamente quanto possível (Chiles e Delfiner, 1999).

Segundo Deutsch e Journel (1998), a simulação estocástica consiste no processo de construir realizações equiprováveis em uma região  $A$  de um atributo  $z(u)$ ,  $u \in A$ , sendo cada realização denominada por  $l: \{z^l(u), u \in A\}$ . Essa simulação é dita condicional se as realizações resultantes  $l$  honrarem os valores dos dados nas suas localidades, pela relação:

$$z^{(l)}(u) = z(u_\alpha), \forall l \quad \forall u = u_\alpha, \alpha = 1, \dots, n \quad (2-6)$$

na qual  $l$  são as realizações,  $z(u)$  a variável simulada no local  $u$  e  $z(u_\alpha)$  o valor do dado  $\alpha$  no local  $u_\alpha$ . A variável  $z(u)$  pode ser do tipo categórica indicando a presença ou ausência de um determinado tipo de rocha ou vegetação, ou pode ser do tipo contínua como a concentração de um determinado bem mineral ou a porosidade de um reservatório.

Ao invés de gerar modelos com a melhor estimativa local, a simulação estocástica produz realizações dos  $z$ -valores que reproduzam as estatísticas mais relevantes para o problema analisado. Para Goovaerts (1997), os requisitos para a simulação condicional são:



- os valores dos dados são honrados nos locais de acordo com a equação 2-6, condicionando a simulação aos dados.
- os histogramas dos valores simulados reproduzem o histograma dos dados desagrupados.
- o modelo de covariância  $C(h)$  ou o modelo de covariância dos indicadores  $C_I(h; z_k)$  para vários limiares  $z_k$  são reproduzidos.

Cada realização deve reproduzir as propriedades impostas no modelo de função aleatória  $Z(u)$ , então quanto mais propriedades foram inferidas dos dados amostrais e incorporadas ao modelo, melhor será o modelo simulado.

### 2.3.1. Simulação Sequencial Gaussiana

A simulação sequencial gaussiana (SSG) consiste na aplicação dos princípios de simulação sequencial para funções randômicas com distribuições gaussianas. Ela pode ser aplicada para qualquer função de distribuição condicional, desde que seus parâmetros possam ser determinados por krigagem simples (SK). A função condicional apresenta média e variância semelhantes aos valores obtidos na SK.

A função randômica gaussiana possui média constante, o que permite o uso da krigagem simples na SSG. Para que uma função randômica seja utilizada na SSG, é necessário que seja uma função multi-gaussiana estacionária que preserve o modelo de covariância. Para tal, uma normalização dos dados originais é necessária.

A função randômica  $Z(u)$  é dita gaussiana multivariada se os seus subconjuntos também forem gaussianos e multivariados, se a combinação linear das variáveis randômicas forem gaussianas, se as duas variáveis não forem correlacionadas e independentes e se as distribuições condicionais da variável randômica forem normais (Deutsch e Journel, 1998).

Segundo Goovaerts (1997), ao considerar um atributo contínuo  $z$  em  $N$  nós  $u'_j$  de um grid condicional para o banco de dados  $\{z(u_\alpha), \alpha = 1, \dots, n\}$ , temos que a simulação sequencial gaussiana é dada por três etapas principais descritas a seguir:

- a primeira etapa consiste em verificar se o modelo de função randômica obedece uma distribuição multi-gaussiana, o que torna necessário primeiro transformar os  $z$ -dados em  $y$ -dados através de uma função de transformação normal. A distribuição normalizada  $Y(u) = \phi(Z(u))$  é então checada.
- na segunda etapa, a simulação sequencial é realizada nos  $y$ -dados transformados, seguindo a sequência;
- definir um caminho aleatório para que cada nó  $u'$  do grid seja visitado apenas uma única vez;



- em cada nó do grid, são determinados os parâmetros da função de distribuição condicional acumulativa (ccdf) gaussiana  $G(u'; y|(n))$  usando krigagem simples a partir do semivariograma normalizado  $\gamma_y(h)$ ;
- um valor simulado  $y^{(l)}(u')$  da ccdf é retirado e adicionado como condicionante;
- em seguida, é dado prosseguimento para o próximo nó do caminho aleatório, sendo repetidos os dois passos anteriores.
- repetir o processo até que todos os nós do grid sejam visitados.

A última etapa consiste em retro-transformar os dados normalizados simulados  $\{y^{(l)}(u'_j), j = 1, \dots, N\}$  em valores simulados da variável original através da transformação normal inversa dos valores  $y$  pela relação:

$$z^{(l)}(u'_j) = \phi^{-1}(y^{(l)}(u'_j)) \quad j = 1, \dots, N \quad (2-7)$$

na qual  $\phi^{-1}(\cdot) = F^{-1}(G(\cdot))$ , sendo  $F^{-1}(\cdot)$  a função distribuição acumulada (cdf) inversa da variável  $Z$  e  $G(\cdot)$  a cdf gaussiana estandardizada. Essa transformação reversa permite identificar o histograma original de  $F(z)$ . Desta forma, temos que:

$$Prob\{Z^{(l)}(u) \leq z\} = G[\phi(z)] = f(z) \quad (2-8)$$

As demais realizações  $\{z^{(l')}(u'_j), j = 1, \dots, N\}, l' \neq l$ , são obtidas ao repetir o processo a partir da segunda e terceira etapas a partir de diferentes caminhos aleatórios.

A principal limitação do método consiste na necessidade em assumir que a variabilidade espacial pode ser totalmente caracterizada por apenas uma única função covariância. Além disso, ao utilizar de um modelo multigaussiano leva-se a uma desconexão significativa de valores extremos, subestimando a continuidade espacial desses valores (Goovaerts, 1997).

A SSG não condicional foi aplicada na metodologia do parâmetro C da incerteza apresentada no Capítulo 3 e na construção de múltiplas realizações dos contatos no estudo de caso do Capítulo 4.

### 2.3.2. Simulação por Bandas Rotativas

Alguns modelos de covariância podem ser utilizados para reproduzir covariâncias simuladas diretamente no *espaço*  $\mathfrak{R}^n$ . Muitas vezes, é mais simples utilizar o método de bandas rotativas, que permite a construção de simulações no espaço a partir de simulações em linhas ( $\mathfrak{R}^1$ ). Chentsov (1957) foi o primeiro a utilizar o método de bandas rotativas ou Turning Bands em um caso especial de funções brownianas aleatórias. O seu uso em simulação geoestatística foi desenvolvido por Matheron (1973).

A simulação por bandas rotativas pode ser utilizada de modo não-condicional (para reproduzir o modelo de covariância) e de modo condicional (para reproduzir os dados amostrais em suas localizações). A simulação condicional por bandas rotativas possui duas etapas: os valores, para cada nó do grid, reproduzem a covariância dos dados amostrais e os valores obtidos são então condicionados aos dados.

Para entender o método, considere uma linha  $D_1$  em um espaço tridimensional  $\mathfrak{R}^3$  e uma função aleatória unidimensional  $Y(u_{D_1})$  definida na linha  $D_1$ . A RF é estacionária de segunda ordem, com esperança matemática zero,  $E\{Y(u_{D_1})\} = 0$ , e apresenta covariância em uma dimensão  $C^{(1)}(h_{D_1})$ . Seja  $u_{D_1}$ , a projeção de qualquer ponto  $u$  na linha  $D_1$ , e admita uma RF tridimensional como definida por:  $Z_1(u) = Y(u_{D_1}), \forall u \in \mathfrak{R}^3$  (Journal e Huijbregts, 1978). Essa função randômica  $Z_1(u)$  é dita estacionária de segunda ordem, com esperança matemática zero e covariância tridimensional igual a:

$$E\{Z_1(u)Z_1(u+h)\} = E\{Y(u_{D_1}) \cdot Y(u_{D_1} + h_{D_1})\} = C^{(1)}(h_{D_1}) \quad (2-9)$$

na qual  $h_{D_1}$  é a projeção do vetor  $h$  na linha  $D_1$ .

Considerando  $N$  linhas  $D_1, D_2, \dots, D_N$  correspondentes as direções dos vetores  $k_1, k_2, k_3 \dots, k_N$  distribuídos uniformemente sobre a esfera unitária, para cada linha  $D_i$  a realização  $y(u_{D_i})$  da RF  $Y(u_{D_i})$  é gerada isomorficamente para  $Y(u_{D_1})$ , e as  $N$  funções randômicas  $\{Y(u_{D_i}), i = 1 \text{ para } N\}$  são independentes. Usando este método, uma realização tridimensional  $z_i(u) = y(u_{D_i}), \forall u \in \mathfrak{R}^3$ , corresponde a cada realização unidimensional  $y(u)$  (Journal e Huijbregts, 1978). O valor final é determinado para cada ponto  $u$  a partir da soma das  $N$  contribuições das  $N$  linhas:

$$z_s(u) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N z_i(u) \quad (2-10)$$

Segundo Chiles e Delfiner (1999), o método consiste resumidamente em adicionar uma grande quantidade de simulações independentes definidas como linhas de varredura no plano (Figura 2-7). Desta forma, o valor da realização no ponto  $u$  do plano corresponde a soma dos valores obtidos da projeção do ponto  $u$  até a linha simulada em uma dimensão, respeitando a equação 2-10.

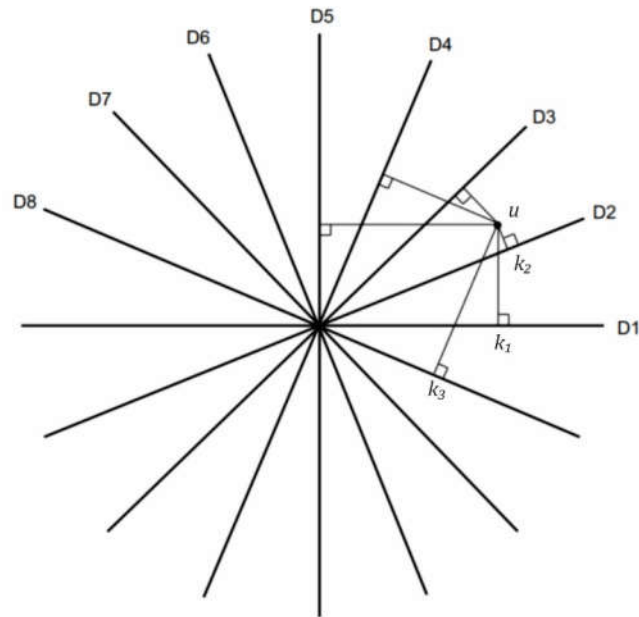


Figura 2-7: Princípio da simulação por bandas rotativas em 2D (modificado de Chiles e Delfiner, 1999).

A escolha da quantidade de linhas ou bandas possui grande impacto na qualidade da simulação. O uso de poucas bandas resulta em simulações de baixa qualidade devido à grande distância entre as bandas. Os resultados com grande quantidade de bandas apresentam melhor qualidade, mas aumenta o esforço computacional e o tempo necessário para a simulação. A simulação por bandas rotativas foi aplicada na metodologia da simulação da função distância apresentada no Capítulo 3 e no estudo de caso do Capítulo 4.

### 2.3.3. Simulação Multipontos

A simulação multipontos surgiu como alternativa à construção de modelos dependentes do semivariograma. Para a geração de modelos geológicos com MPS, é necessário a existência de dados de condicionamento. A partir destes dados, são obtidas estatísticas relevantes, que combinadas a algoritmos de simulação, impõem estatísticas vinculadas aos dados de condicionamento (Ortiz 2008). Métodos de validação devem ser utilizados para garantir que os modelos construídos reproduzam a aparência e propriedades estatísticas consideradas determinantes para a reprodução do depósito.

As imagens de treinamento (TI) são utilizadas como dados de condicionamento para capturar a conectividade espacial entre os múltiplos pontos da simulação. Elas podem ser construídas como modelos conceituais, que imitam padrões espaciais e feições geológicas presentes em subsuperfície (Strebelle, 2002; Journel, 2004; Caers, 2011). A definição dessas imagens, geralmente, é baseada em imagens de sensoriamento remoto, geofísica, modelos análogos, afloramentos e interpretação geológica.

Journel (1992) apresentou pela primeira vez o conceito de MPS, mas somente em 1993 o primeiro algoritmo funcional foi apresentado por Guardiano e Srivastava.

O algoritmo se baseia em uma extensão do processo de simulação sequencial condicional, e consiste na simulação de indicadores nos quais as probabilidades condicionais são obtidas a partir de porções correspondentes da imagem de treinamento. Esta metodologia exige muito processamento computacional devido a necessidade de ler toda a imagem de treinamento para cada nó simulado em uma única realização, o que dificultou a adoção do método.

O desenvolvimento do algoritmo SNESIM (Strebelle, 2002) deu início a utilização dos métodos de simulação MPS na indústria. O método foi inovador ao introduzir a utilização de uma estrutura de dados denominada árvore de busca para armazenar e recuperar rapidamente os padrões apresentados nas imagens de treinamento. Na árvore de busca proposta, a imagem de treinamento é processada uma única vez, sendo as configurações armazenadas em um arquivo, denominado árvore de busca, que permite acessar as informações  $n$  vezes para cada estimativa de pontos não amostrados. As aplicações práticas do algoritmo foram feitas à estudos de caso reais em reservatórios petrolíferos (Caers *et al.*, 2001; Liu *et al.* 2004; Harding *et al.*, 2005).

Após a adoção do SNESIM pela indústria, diversos algoritmos de simulação multipontos foram desenvolvidos para utilização em diferentes cenários e desafios na modelagem geológica: SIMPAT (Arpat, 2004); FILTERSIM (Zhang e Journel, 2008); DISPAT (Honarkhah e Caers, 2010); e IMPALA (Straubhaar *et al.*, 2011). Os principais algoritmos de simulação multipontos apresentam pontos em comum, esses pontos estão sumarizados na Figura 2-8. Essa organização geral para os algoritmos de MPS foi desenvolvida por Mariethoz & Caers (2015), e permanece relativamente consistente e válida. Variações e adaptações específicas são encontradas de acordo com a utilidade e amplitude do método dos algoritmos.

Existem situações em que os métodos de MPS descritos não apresentam resultados satisfatórios devido a imagens de treinamento não apresentarem padrões de repetitividade. Estes casos são comuns na mineração onde os modelos são constituídos por sólidos maciços de grande dimensão, nos quais a localização é determinada, mas a geometria e extensão desconhecidas. O algoritmo DISPAT é apresentado como uma alternativa (Honarkhah & Caers, 2010) que possibilita perturbar uma imagem de treinamento definida no grid de simulação. Dimitrakopoulos *et al.* (2010) apresentam outra proposta, na qual são inferidas estatísticas de múltiplos pontos diretamente a partir de furos de sondagem.

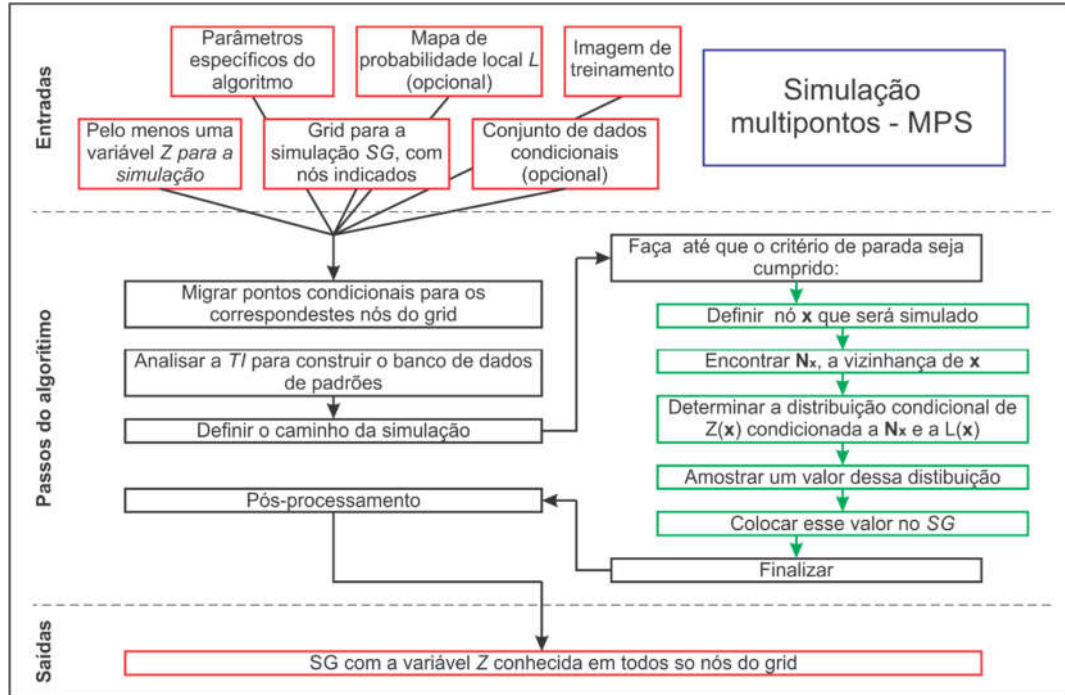


Figura 2-8: Esquema síntese dos elementos comuns aos algoritmos de MPS. (Adaptado de Mariethoz & Caers, 2015)

### 3. MODELOS GEOLÓGICOS ESTOCÁSTICOS

Este capítulo apresenta os principais fundamentos das metodologias utilizadas para avaliar a incerteza dos contatos de modelos geológicos. A primeira metodologia consiste em um algoritmo de geoestatística multiponto que tem como foco a reprodução de padrões dos contatos entre litologias. As demais metodologias se baseiam em funções distâncias assinaladas para a construção de modelos implícitos e a incerteza associada a estes modelos.

As metodologias apresentadas neste capítulo foram aplicadas a estudos de caso apresentados no Capítulo 4. O fluxograma apresentado na Figura 3-1 sumariza as metodologias apresentadas neste a capítulo.

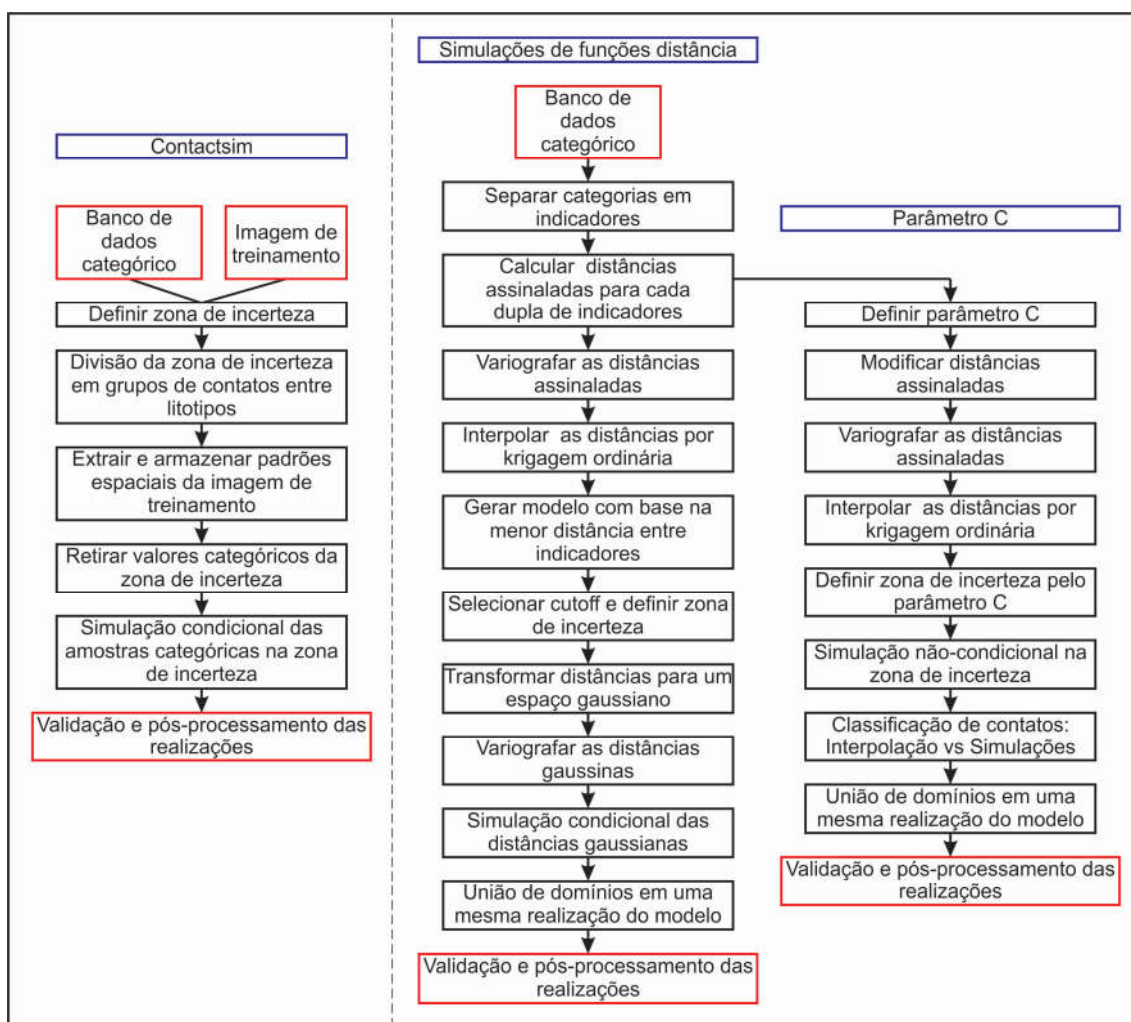


Figura 3-1: Fluxograma ilustrado das metodologias adotadas para caracterizar a incerteza dos contatos. A esquerda está representada o fluxograma do método MPS. No centro e a direita, estão representados os fluxogramas de duas metodologias de modelagem implícita por funções assinaladas.

### 3.1 Geoestatística Multipontos

A modelagem geoestatística de variáveis categóricas tradicionalmente é dividida em duas famílias de algoritmos de simulação: a baseada em pixels e a baseada em objetos. Os algoritmos baseados em pixels constroem realizações a partir de um pixel por vez, o que permite uma grande flexibilidade no condicionamento de dados com diferentes suportes e de diferentes tipos. Entretanto, esses algoritmos tendem a comprometer a velocidade de execução e apresentam dificuldade em reproduzir formas geométricas complexas, principalmente em metodologias em que a simulação é restringida por variograma. Algoritmos baseados em objetos constroem as realizações colocando no grid de simulação um objeto ou padrão de cada vez, portanto eles podem ser rápidos e fiéis à geometria do objeto. Entretanto, esses algoritmos apresentam problemas ao condicionar a simulação aos dados locais para diferentes suportes, principalmente quando esses dados são densos, como em levantamentos sísmicos (Remy et. al 2009).

A representação de fenômenos naturais normalmente é feita através de imagens construídas através da interpretação, representação e modelagem de processos dos fenômenos de interesse. Uma imagem pode ser definida como a representação exaustiva de um processo implantado no espaço e no tempo. Os métodos de geoestatística multipontos utilizam de imagens de treinamento (TI) como um repositório dos padrões e suas probabilidades encontradas no fenômeno. Para que isso seja reproduzido, a TI deve ter padrões repetitivos, mas não necessariamente de tendências ou informações locais.

Muitas vezes é mais fácil construir uma representação gráfica do fenômeno como é, ou seja, com as tendências, em vez de dividi-lo em padrões repetitivos que não são específicos do local (Boucher, 2009). A construção da TI geralmente se baseia em afloramentos, imagens de sensoriamento remoto, modelos geofísicos, modelos análogos e interpretação geológica.

Considerando uma variável aleatória  $S$ , que pode pertencer a  $K$  classes  $\{s_k, k = 1, \dots, K\}$ , nas quais  $S$  representa diferentes categorias, temos que a imagem de treinamento como uma representação de como os valores de uma determinada propriedade  $s_k$  está distribuída no espaço (Strebele 2002). A TI é considerada como uma representação não condicional da função aleatória  $S(u)$ , uma representação conceitual prévia da distribuição espacial dos valores da variável  $s_k$ , que não precisa necessariamente honrar a localização do conjunto amostral  $n(u)$  de  $s_k$ .

A utilização de imagens de treinamento para a inferência estatística apresenta como principais vantagens (Lyster, 2009):

- Existe, substancialmente, mais informação fornecida ao usar MPS em comparação com estatísticas espaciais de dois pontos, como variograma ou covariograma.
- Não há agrupamento ou cálculo de médias de dados dispersos em conjuntos de lags.
- Não existe a necessidade de assumir um espaço Gaussiano ou um modelo de campo aleatório.

- Relações complexas entre unidades geológicas podem ser identificadas.

Guardiano e Srivastava (1993) apresentaram o método, baseado na simulação sequencial, no qual a inferência das probabilidades condicionais dos valores simulados ocorre através de proporções condicionais obtidas a partir da varredura da TI em busca de padrões. A simulação é realizada em uma função de massa de probabilidade condicional (cpmf) do local não amostrado do grid de simulação, que é usada posteriormente como dado condicionante.

O processo de varredura da imagem de treinamento é realizado a partir de um *template* ou vizinhança de busca  $\tau_j$ , composto de um conjunto de  $J$  vetores  $\{h_j, j = 1, \dots, J\}$ , que informa quais pontos da TI serão considerados relevantes em relação a um ponto central  $u_0$  do nó do grid a ser simulado. A Figura 3-2 apresenta o exemplo de *template* de busca em duas dimensões com quatro vetores  $h_j$ .

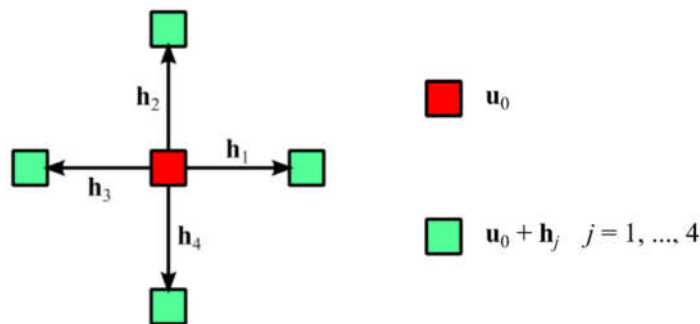


Figura 3-2: Exemplo de *template* ou vizinhança de busca com 4 vetores (Rasera, 2014).

Entretanto, como este método exige que a varredura da imagem de treinamento seja realizada para cada nó do grid não amostrado durante a simulação, é demandado de um grande esforço computacional. Como alternativa, Strébelle (2002) propôs varrer a imagem de treinamento uma única vez, na qual os padrões da TI são armazenados em um arquivo, denominado árvore de busca ou *search tree*, que possibilita o acesso as informações para cada nó não amostrado simulado.

### 3.1.1. Árvore de busca

Strebelle (2000) desenvolveu o algoritmo SNESIM que combina as duas classes tradicionais de algoritmos de simulação, os algoritmos baseados em pixels e os algoritmos baseados em objetos. O algoritmo apresenta duas partes principais, a construção da árvore de busca na qual todas as proporções retiradas da imagem de treinamento são armazenadas, e a parte da simulação na qual as proporções são lidas e usadas para retirar valores simulados. O SNESIM pode ser resumido nos seguintes passos:

- varrer a imagem de treinamento com o objetivo de construir a árvore de busca dos dados ao tamanho do molde escolhido  $\tau_j = \{h_\alpha, \alpha = 1, \dots, n\}$ ;



- definir um caminho aleatório para que cada nó  $u$  do grid seja visitado apenas uma única vez;
- construir a ccdf para o local  $u_j$ , a partir das proporções extraídas da imagem de treinamento;
- um valor simulado da ccdf é retirado e adicionado ao banco de dados, e usado como condicionante nas demais locais;
- em seguida, é dado prosseguimento para o próximo nó do caminho aleatório, sendo repetidos os dois passos anteriores;
- repetir o processo até que todos os nós do grid sejam visitados.

As demais realizações são obtidas ao repetir o processo a partir da terceira etapa em diferentes caminhos aleatórios.

A Figura 3-3 apresenta a imagem de treinamento, com duas categorias branco e preto, e o *template* de busca para a região central em cinza, referente ao local desconhecido a ser simulado. Os locais adjacentes enumerados de 1 a 4 remetem aos dados categóricos conhecidos ou não, definidos como evento de dados. Esses números são a ordem convencionada para montar a árvore de busca. O *template* é definido indiretamente pelo modelador, informando o número máximo de pontos e os parâmetros geométricos de um elipsoide: dimensões dos semieixos e os ângulos de rotação. A TI com duas categorias é varrida, para a construção da distribuição de probabilidades, considerando o *template* de busca.

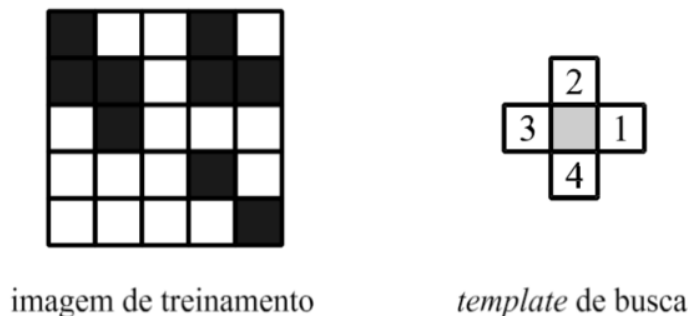


Figura 3-3: Imagem de treinamento para duas categorias e *template* de busca.

A estrutura de dados denominada árvore de busca é definida pela vizinhança para otimizar as buscas pelas propriedades ao montar a cpmf, que é utilizada no sorteio das variáveis em um determinado local. O tamanho do *template* controla a complexidade da árvore de busca e a memória e tempo gastos na simulação. A quantidade de categorias e o tamanho da TI também afetam o tamanho da árvore de busca.

A Figura 3-4 apresenta um exemplo de árvore de busca construída a partir da imagem de treinamento e *template* apresentados na Figura 3-3, de modo que cada

nível corresponde a uma região da vizinhança de busca. A árvore de busca tem início com a determinação da raiz, como o evento de dados vazio, na qual a frequência associada corresponde a proporção global de categorias pretas ou brancas encontrada em uma TI erodida. A TI é considerada como erodida ao equivaler ao maior subconjunto da imagem de treinamento, no qual o *template* é totalmente contido. As variáveis B e P indicam o número de ocorrências das categorias no local desconhecido e a frequência de cada padrão é dada a partir da TI erodida. Desta forma, a *search tree* armazena o número de ocorrências de cada categoria em relação ao nó central cinza do *template*, o que resulta na proporção de ocorrência das duas categorias.

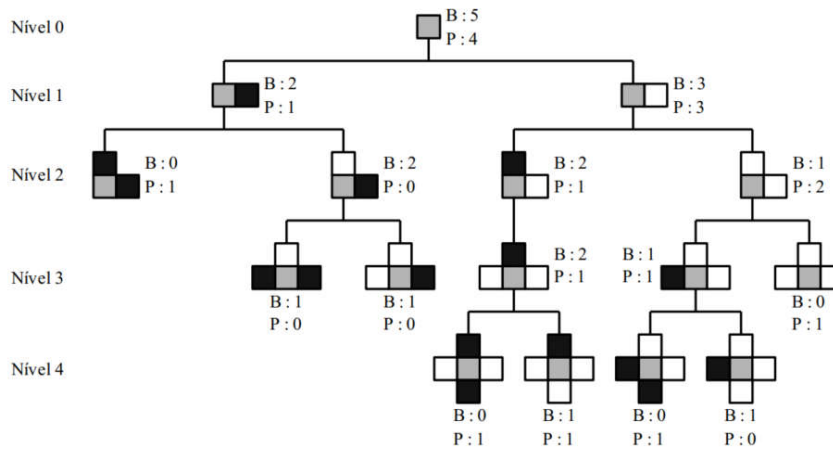


Figura 3-4: Árvore de busca obtida a partir da imagem de treinamento e o *template* descritos anteriormente (Modificado de Boucher, 2007).

Com objetivo de simular representações espaciais complexas diretamente de uma imagem de treinamento realista, Boucher (2009) propôs a metodologia da divisão da árvore de busca. O método visa flexibilizar a árvore de busca ao dividir uma TI complexa em pequenas classes, nas quais os padrões associados são homogêneos e podem ser eficientemente armazenados em uma árvore de busca. Essas classes não são necessariamente espacialmente contínuas, e podem ser definidas a partir de filtros responsáveis por discernir os diferentes padrões dentro de uma mesma TI. Desta forma, é possível construir árvores de busca para cada classe de partição. Definir partições a partir da TI fornece padrões que conectam as classes de partição, e soluciona a principal desvantagem da abordagem de regiões, a modelagem das transições entre regiões.

Aplicar filtros em uma imagem de treinamento, produz pontuações que servem como indicativo de padrões ocultos. Neste ponto, existe uma TI dupla, composta da TI original e das pontuações  $a(v)$ , obtidas ao aplicar os filtros. Os mapas dessas pontuações são particionados com o algoritmo  $\psi(a(v))$  na série de classes  $\theta_d, d = 1, \dots, D$ , nas quais cada classe possui valores similares de pontuação. Considerando a classe de partição  $\theta^{TI}(v)$ , o pixel  $v$  na TI é dado pela relação:

$$\theta^{TI}(v) = \psi(a(v)) \quad (3-1)$$

na qual  $\psi()$  é o algoritmo que particiona as pontuações do filtro em  $D$  classes. Através destas classes de partição  $\theta_d, d = 1, \dots, D$ , os padrões de TI estão ligados às pontuações de filtro. Os padrões encontrados em cada classe de partição  $d$  são registrados em cada árvore de busca  $T_d$  correspondentes a partição  $\theta_d$ . Deste modo, existe uma única árvore de busca  $T_d$  por partição (Boucher, 2009), de modo, que cada evento de dados no local  $v_i$  é registrado em sua árvore de busca correspondente  $T_{\theta^{TI}(v_i)}$ .

A grande árvore de busca original, que seria obtida a partir da TI complexa, é substituída por um vetor composto de árvores de busca menores  $T_d, d = 1, \dots, D$ . Essa metodologia que permite dividir a árvore de busca é parte do algoritmo *contactsim*, descrito a seguir.

### 3.1.2. Algoritmo *contactsim*

O algoritmo foi introduzido por Boucher *et al.* (2014) para a reprodução de padrões de contatos entre tipos geológicos distintos, considerando o pressuposto que a incerteza geológica decresce ao se afastar dos contatos interpretados. Os padrões relevantes serão aqueles pertencentes a região de transição entre litotipos. Desta maneira, o algoritmo busca reproduzir os limites entre domínios geológicos, ao invés de reproduzir o formato completo de um único domínio. Com o objetivo de reproduzir esses padrões, é definida zona de incerteza em torno dos contatos na qual serão realizadas as simulações, e que servirá como repositório de padrões da imagem de treinamento. A definição desta zona é uma etapa crucial no método, já que quanto maior a zona de incerteza, mais dissimilares serão as realizações.

Após a definição da zona de incerteza, a imagem de treinamento é reduzida para a zona de incerteza, e os padrões agrupados em classes com base em métricas de similaridade. Este agrupamento será realizado com base nos litotipos ou considerando informações mais complexas como a orientação espacial. Para simular os contatos a partir de um modelo de blocos interpretado, é necessário particionar a árvore de busca ré-processada e agrupar os modelos, o que permite localizar e classificar todos os contatos entre em classes e simular as zonas de contato usando mesma partição (Boucher *et al.*, 2014). Para dividir as classes, é necessário que os padrões relevantes sejam usados para apenas uma dada região, sendo a relevância dos padrões de cada classe dada pelas regras estabelecidas para a divisão. Desta forma, o algoritmo é baseado em quatro etapas sequencias:

- definir a zona de incerteza em volta dos contatos.
- particionar as zonas de incerteza em grupos semelhantes, por exemplo, o contato entre litotipos A e B como um grupo, enquanto o contato entre B e C como outro grupo.
- extrair e armazenar os padrões espaciais da zona de incerteza em uma estrutura de árvore de busca para cada grupo de partição.

- remover valores de litotipos na zona de incerteza e simular condicionalmente aos valores do modelo de blocos de alta confiança e a informação dos furos vizinhos.

A Figura 3-5-A apresenta o modelo de referência com quatro atributos categóricos. Assumindo que a posição relativa de cada categoria é conhecida, para determinar a incerteza pelo método, é necessário perturbar o contato entre as quatro categorias. Na região central superior e no canto direito superior da imagem, são apresentadas duas zonas de incerteza referentes às espessuras de 20 e 40 metros, de onde os padrões da TI serão retirados do modelo de referência, e também, onde será realizada a simulação. Cada zona de incerteza, foi dividida em sete classes de partição referentes aos tipos de contatos (Figura 3-5-D e Figura 3-5-E), para cada classe, foi construída uma árvore de busca. A região é decomposta nas sete classes, sendo que cada parte detém os padrões da TI e formam os domínios para a simulação.

As regiões externas a zona de incerteza são consideradas durante a construção da árvore de busca. Na simulação, os valores fora da zona de incerteza são usados como dados de condicionamento (Boucher *et al.*, 2014).

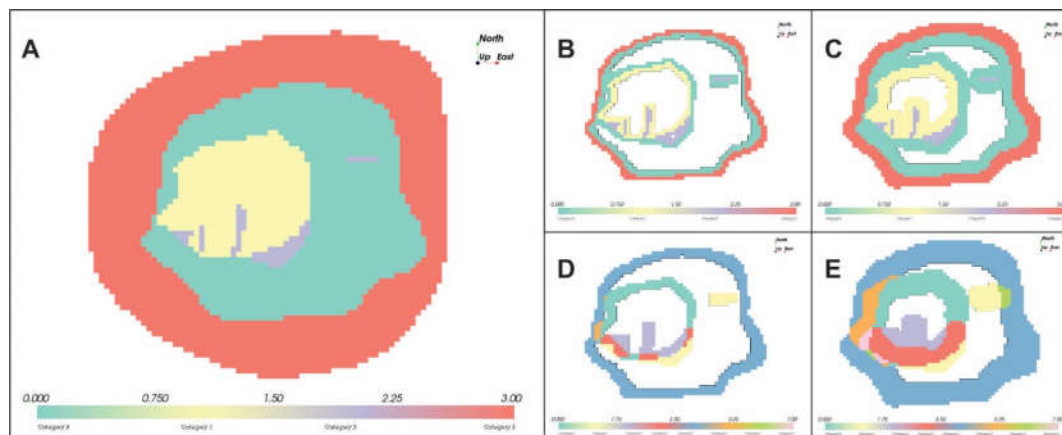


Figura 3-5: Método *contactsim* para quatro categorias (amarela, cinza, verde e vermelha). No lado esquerdo em A, o modelo de referência utilizado. Em B e C, são apresentadas as zonas de incerteza para 20 e 40 metros em relação ao contato. Em D e E, a classificação das zonas de incerteza em diferentes grupos, que serão armazenados na estrutura da árvore de busca.

As realizações para cada simulação das zonas de contatos de 20 e 40 m são apresentadas na Figura 3-6. Na região superior da imagem, são exibidas as quatro realizações para a zona de 20 m, e na região inferior são exibidas as quatro realizações referentes a uma zona de 40 metros.

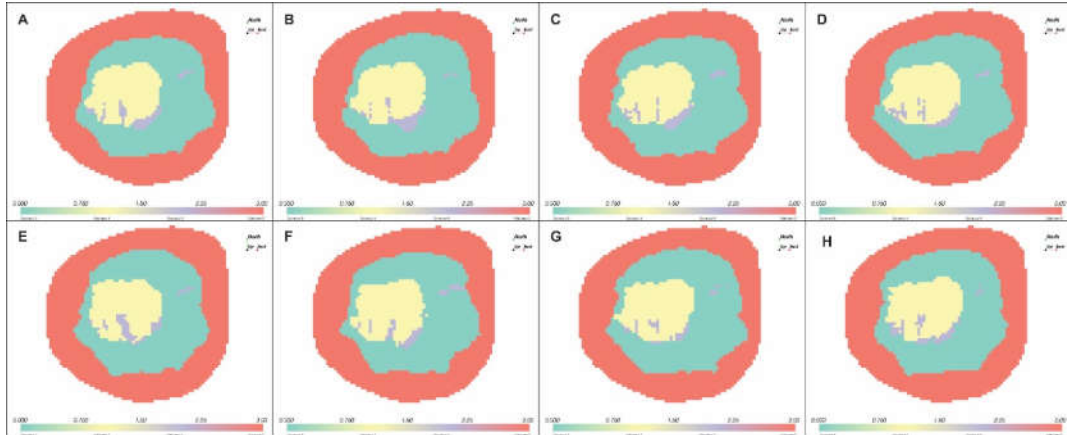


Figura 3-6: Simulação do modelo de referência para dois tamanhos da zona de incerteza. Na parte superior da imagem, de A a D quatro realizações para a zona de incerteza de 20 metros. Na parte inferior da imagem, E a H quatro realizações para a zona de incerteza de 40 metros.

### 3.2 Modelagem Implícita

Modelos geológicos descrevem o formato, o volume e a extensão do litotipos no espaço. As técnicas de modelagem implícita têm por objetivo auxiliar a interpretação geológica e a construção de modelos, ao demarcar os limites entre domínios de modo objetivo, e que permita reprodução.

Nesta seção, serão apresentados os algoritmos que utilizam funções implícitas na construção de modelos geológicos, e a avaliação de como pode-se acessar a incerteza associada a esse tipo de modelo. Alguns exemplos são apresentados para ilustrar o uso prático dos algoritmos apresentados e as vantagens e limites de cada método.

#### 3.2.1. Algoritmo distâncias assinaladas

A função distância utilizada se baseia na distância euclidiana entre uma amostra e a amostra mais próxima de um indicador distinto. Desta forma, é necessário que o banco de dados  $\{Z(u_\alpha), \alpha = 1, \dots, n\}$  utilizado seja previamente codificado como pertencente ou não ao domínio que está sendo modelado através da relação:

$$i(u_\alpha) \begin{cases} 1, \text{ se } u_\alpha \text{ está dentro do domínio} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3-2)$$

Para cada local amostral  $u_\alpha$ , o local  $u'_\alpha$  da amostra mais próxima é obtido pelo menor valor da diferença  $u_\alpha - u'_\alpha$ , dado que  $i(u_\alpha) \neq i(u'_\alpha)$ . Desta forma, a menor distância entre a localização de duas amostras pertencentes à domínios opostos é o valor da função distância para o local  $u_\alpha$ . Caso o local  $u_\alpha$  pertença ao domínio, o valor da função distância é negativo, caso contrário, positivo. A função distância assinalada é dada pela relação:

$$\begin{aligned} df(u_\alpha) &= +(u_\alpha - u'_\alpha), \text{ se } i(u_\alpha) = 0 \\ df(u_\alpha) &= -(u_\alpha - u'_\alpha), \text{ se } i(u_\alpha) = 1 \end{aligned} \quad (3-3)$$

Para situações em que existe anisotropia na forma do domínio a ser modelado, a distância assinalada pode ser calculada pela equação 3-4, na qual  $d_x$ ,  $d_y$  e  $d_z$  representam as diferenças entre as coordenadas das amostras e  $h_x$ ,  $h_y$  e  $h_z$  os alcances da anisotropia geométrica dos eixos. Portanto, a função distância é ajustada favorecendo a direção de maior continuidade espacial, ao invés de considerar todas as direções equivalentes.

$$d = \sqrt{\left(\frac{dx}{hx}\right)^2 + \left(\frac{dy}{hy}\right)^2 + \left(\frac{dz}{hz}\right)^2} \quad (3-4)$$

Após obter a função distância, o novo banco de dados das distâncias associadas a cada datum é interpolado para todos os locais de interesse (grid). Qualquer método de interpolação pode ser utilizado nessa tarefa, por exemplo: inverso da distância, krigagem global ordinária, krigagem LVA ou funções de base radiais (RBF) e produzem resultados satisfatórios. Wild e Deutsch (2012) recomendam o uso de algoritmos de interpolação global já que apresentam modelos com resultados suaves e livres de artefatos. Esses algoritmos utilizam todos os dados para estimar cada local, o que inibe a geração de artefatos gerados a partir da adição de dados condicionantes na janela de busca. A krigagem global considera a redundância entre os pontos amostrais na determinação dos pesos da krigagem, sendo preferível em detrimento aos demais métodos de interpolação (Neufeld e Wilde, 2005). A krigagem apresenta vantagens, já que minimiza a variância do erro, dados uma média estacionária (krigagem simples) e funções variância e covariância, parametrizados a partir dos dados.

Apesar da krigagem global ser a mais indicada para a interpolação de funções distâncias, o método se torna restrito e de difícil implementação devido à alta demanda computacional quando há muitos dados. A krigagem ordinária (OK) pode ser utilizada como alternativa a krigagem global para diminuir o esforço computacional (Rollo *et al.* 2017). Ao utilizar a krigagem ordinária, é necessário considerar uma grande vizinhança de busca e uma grande quantidade de dados dentro desta vizinhança. O tempo de processamento na interpolação pode ser controlado pela quantidade de dados considerados na interpolação. A interpolação das distâncias assinaladas por OK é dada pela relação:

$$d^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}^{OK}(u) d(u_{\alpha}) \quad (3-5)$$

na qual  $d^*(u)$  é a distância estimada para cada local não amostrado  $u$ ,  $\lambda_{\alpha}^{OK}$  os pesos da krigagem e  $d(u_{\alpha})$  o valor da função distância assinalada calculada para cada amostra.

A classificação dos domínios é a última etapa do método. Locais em que a função apresenta valores negativos são classificados com pertencentes ao domínio, enquanto blocos com valor positivo são classificados como não pertencentes (equação 3-6). A interface ou limite que divide os domínios é obtida pela linha ou superfície gerada pelos valores iguais a zero (Wilde e Deutsche, 2011a).

$$i^*(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } d^*(u) \leq 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3-6)$$

A Figura 3-7 apresenta um exemplo da metodologia distância assinalada. No canto esquerdo superior, são apresentados os dados categóricos no plano xy classificados de acordo com os dois domínios de interesse, o domínio branco e o domínio preto. Cada amostra é assinalada com a distância entre ela e a amostra do domínio oposto mais próxima, demonstrado pela imagem no canto superior direito. A krigagem ordinária foi aplicada para estimar as distâncias para todos os locais de interesse, e o resultado é apresentado na imagem inferior esquerda. Os domínios classificados pelo método são apresentados na imagem inferior direita.

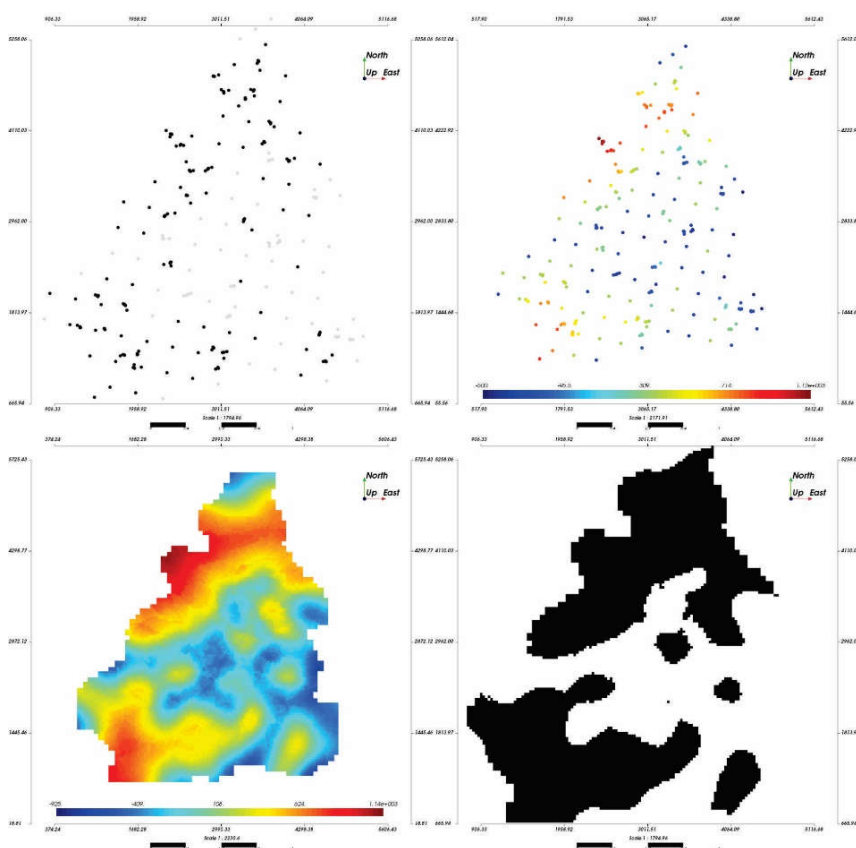


Figura 3-7: Método distâncias assinaladas. O canto superior esquerdo, as amostras no plano xy divididas nos domínios (pontos pretos e brancos identificando cada domínio). A imagem do canto superior direito apresenta a função distância assinalada calculada para cada amostra. No canto esquerdo inferior, a função distância interpolada para todos os locais de interesse. No canto direito inferior, o modelo construído a partir da função distância assinalada (preto e branco).

### *Distâncias assinaladas para múltiplos domínios*

Modelos geológicos geralmente apresentam diversos domínios litológicos, entretanto, o método de distâncias assinaladas apresentado anteriormente é utilizado apenas em casos binários (dois domínios). O algoritmo apresentado a seguir, proposto por Silva & Deutsch (2012a), apresenta uma solução para múltiplos domínios.

Considerando a existência de K múltiplos domínios em um depósito, para todos os locais amostrados  $\{z(u_\alpha), \alpha = 1, \dots, n\}$ , um vetor indicador de K elementos é codificado de acordo com a relação:

$$i_k(u_\alpha) \begin{cases} 1, & \text{se } z(u_\alpha) = k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad k = 1, \dots, K \quad (3-7)$$

Assim como apresentado na equação 3-3, a distância assinalada em relação a amostra mais próxima do domínio oposto é calculada individualmente para cada um dos ks elementos do vetor. Da mesma forma que no caso binário, os sinais da distância permanecem os mesmos, negativos dentro do domínio e positivo fora do domínio:

$$d_k(u_\alpha) = \begin{cases} -||u_\alpha - u_\beta||, & \text{se } i_k(u_\alpha) = 1 \\ +||u_\alpha - u_\beta||, & \text{se } i_k(u_\alpha) = 0 \end{cases} \quad k = 1, \dots, K \quad (3-8)$$

A interpolação das distâncias assinaladas é realizada para cada elemento k, desta forma a krigagem ordinária é aplicada diversas vezes de acordo com a relação:

$$d_k^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha^{OK}(u) d_k(u_\alpha) \quad k = 1, \dots, K \quad (3-9)$$

Em situações que os diversos variogramas são similares, um único variograma pode ser considerado, o que reduz o tempo de processamento já que as equações de krigagem são resolvidas apenas uma vez para todos os indicadores. Portanto, o modelo final é determinado por:

$$i^*(u) = k' \quad \text{de modo que} \quad d_{k'}^* = \min\{d_k^*(u)\}_{k=1}^K \quad (3-10)$$

A distância estimada determina a proximidade do local  $u$  em relação ao domínio oposto mais próximo, e desta maneira, o valor mínimo estimado da distância assinada pode ser considerado como o domínio mais provável de ser encontrado no local não amostrado (Silva, 2015), como demonstrado na equação 3-10. O indicador associado ao menor valor da estimativa determina o domínio presente nesse local.

### 3.2.2. Incerteza associada ao modelo implícito

Uma das principais fontes de incerteza na construção de modelos de depósitos minerais está associada a definição correta das posições dos contatos geológicos, já que impactam diretamente no volume dos diversos litotipos que formam o depósito. Os modelos implícitos interpolados a partir de uma função distância não permitem acessar a incerteza de modo direto. Entretanto, é possível modificar a função para quantificar a incerteza.

A incerteza global associada a limites de formas volumétricos, depende da quantidade de amostras e dados geológicos disponíveis. McLennan e Deutsch (2006) propuseram acessar a incerteza a partir de uma técnica denominada *spatial bootstrap*. Outra abordagem foi proposta por Hosseini e Deutsch (2007), que consiste no uso da função distância para quantificar a incerteza de limites de áreas ou regiões a partir de um elevado número de limites sintéticos.

Ao calibrar dois parâmetros  $C$  e  $\beta$  é possível medir a incerteza dos limites entre domínios geológicos, considerando que  $C$  controla a espessura da zona de incerteza e  $\beta$  controla o viés (Munroe e Deutsch, 2008). Esses parâmetros podem ser



otimizados para acessar devidamente a incerteza, para tanto, Wilde e Deutsch (2011a) sugerem uma metodologia simples para calibrar o parâmetro C baseada em *jackknife*. As múltiplas realizações dos contatos geológicos são obtidas a partir da simulação de valores uniformes dentro da zona de incerteza obtida ao calibrar o parâmetro C (Wilde e Deutsch, 2011b).

Outra possibilidade para acessar a incerteza, consiste na construção de múltiplos cenários equiprováveis a partir da simulação condicional de funções distância assinaladas (Cáceres *et al.*, 2011). Além disso, a incerteza pode ser medida de maneira heurística pelo pós-processamento das distâncias estimadas ao calcular-se as probabilidades em cada local considerando as distâncias interpoladas mais próximas (Silva e Deutsch, 2013).

#### *Medida heurística de incerteza*

A função *softmax activation* proposta por Silva e Deutsch (2013), a partir da teoria de redes neurais, como uma alternativa para calcular a probabilidade condicional em locais não amostrados em casos em que estão presentes múltiplas classes de rochas.

O método tem por objetivo transformar os valores estimados para as distâncias em resultados que possam ser interpretados posteriormente como probabilidades condicionais. Os valores são transformados para valores entre 0 e 1, desta forma a função pode ser usada como método de classificação de probabilidades para múltiplos resultados. A função é apresentada pela relação abaixo:

$$P(i(u) = k) = \frac{e^{-\frac{d_k^*(u)}{Y}}}{\sum_{k'=1}^K e^{-\frac{d_{k'}^*(u)}{Y}}}, \{k = 1, \dots, K\} \quad (3-11)$$

na qual  $P(i(u) = k)$  representa a probabilidade do local  $u$  pertencer a categoria  $k$ ,  $d_k^*(u)$  a distancia assinalada estimada para a categoria  $k$  e  $Y$  o parâmetro que regula a interrelação entre probabilidades das  $K$  categorias, de modo que um valor elevado leva a uma grande diferença entre probabilidades.

#### *Medida estocástica de incerteza*

A incerteza do modelo geológico pode ser avaliada a partir da simulação das distâncias assinaladas, em que diversas realizações equiprováveis para os modelos geológicos são obtidas ao simular condicionalmente a região dos contatos entre domínios. É necessário definir a zona de incerteza ao redor dos contatos, na qual as distâncias serão simuladas condicionalmente. Para isso, são listados os menores valores encontrados nas distâncias entre as  $k$  categorias para cada bloco do modelo, de acordo com a relação:

$$D_{MIN} = \{\min\{d_k^*(u_1)\}, \dots, \{\min\{d_k^*(u_n)\}_{k=1}^K\} \quad (3-12)$$

O coeficiente  $U$  reflete a incerteza quanto a localização do contato geológico, a partir das distâncias assinaladas que determinam a proximidade de um local  $u$  ao domínio oposto mais próximo (Souza, 2017). O coeficiente é obtido pela relação:

$$U(u) = \frac{\max\{D_{MIN}\} - \min\{d_k^*(u)\}_{k=1}^K}{\max\{D_{MIN}\} - \min\{D_{MIN}\}} \quad (3-13)$$

na qual  $\max\{D_{MIN}\}$  é o valor máximo,  $\min\{D_{MIN}\}$  o valor mínimo da lista de menores valores e  $\min\{d_k^*(u)\}_{k=1}^K$  a menor distância assinalada para o nó do grid  $u$ . A lista de coeficientes  $U$  obtidos pela equação 3-12 apresenta valores entre 0 e 1, sendo necessário determinar um valor de corte que determine a extensão da zona de incerteza. Valores mais próximos de 1 definem uma zona de incerteza estreita, já valores próximos a 0 definem zonas de incerteza mais espessas. Após determinada a zona de incerteza, as distâncias assinaladas pertencentes a essa região são simuladas condicionalmente, construindo diversos cenários para os contatos entre domínios geológicos.

A Figura 3-8 apresenta um exemplo da incerteza obtida a partir da simulação condicional das distâncias assinaladas. A partir das distâncias estimadas que deram origem ao modelo geológico apresentado em A, foram calculados os coeficientes  $U$  do modelo apresentado em B. A zona de incerteza apresentada em C foi construída ao aplicar o *cutoff* 0,65 no modelo de coeficientes  $U$ . Na região inferior da imagem são apresentadas três realizações da simulação condicional das distâncias assinaladas.

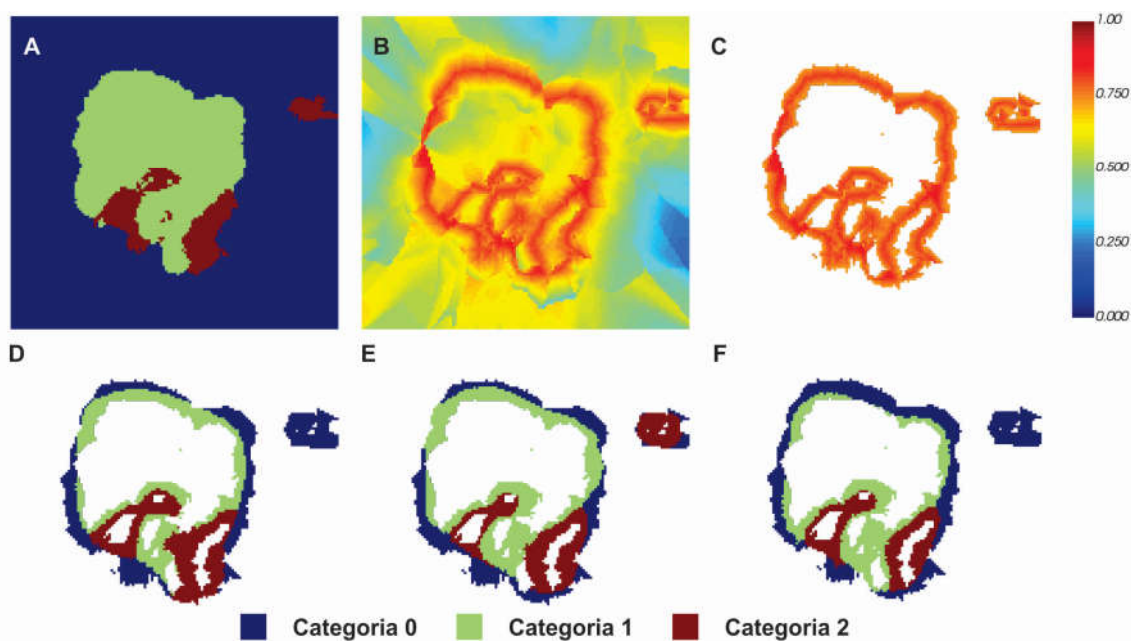


Figura 3-8: Determinação da zona de incerteza. Em A, o modelo geológico determinístico. Em B, o modelo com valores  $U$ . Em C, zona de incerteza para o *cutoff* de 0,65. Na parte inferior da imagem, de D a F três realizações para a zona de incerteza.

### Parâmetro da incerteza

Em muitos casos, é interessante para o empreendimento mineiro a avaliação da incerteza relacionada à posição dos contatos entre os domínios geológicos. Para avaliar essa incerteza, é necessário definir uma zona de incerteza ao redor dos contatos entre os domínios. Essa região pode ser obtida considerando um parâmetro

da incerteza C adicionado à função distância, responsável por controlar a espessura da região de incerteza.

O parâmetro C adiciona uma constante à distância euclidiana, o que gera um aumento na separação entre dois dados amostrais. Desta forma, o uso deste parâmetro tem como objetivo aumentar a diferença entre os valores positivos e negativos da função distância, o que amplia simultaneamente a largura da distribuição e a faixa de volumes possíveis. Os blocos localizados fora da zona de incerteza serão considerados como pertencentes a um determinado domínio geológico, enquanto blocos dentro da zona terão sua incerteza avaliada. O parâmetro modifica a função ao somar o valor do parâmetro a locais fora do domínio e subtrair em locais pertencentes ao domínio:

$$\begin{aligned} \bar{d}f(u_\alpha) &= df(u_\alpha) + C, \text{ se } i(u_\alpha) = 0 \\ \bar{d}f(u_\alpha) &= df(u_\alpha) - C, \text{ se } i(u_\alpha) = 1 \end{aligned} \quad (3-14)$$

A escolha do parâmetro C depende de dois fatores, o nível de acurácia desejado e o tempo disponível para a calibração do parâmetro. Ele pode ser determinado de três formas distintas: determinação empírica, calibração parcial e calibração total. A determinação empírica se baseia em valores predeterminados e conhecimento a respeito do fenômeno pelo modelador. Segundo Karpekov e Deutch (2016), é possível realizar a calibração empírica, considerando a malha amostral e a experiência e conhecimento do especialista. A calibração parcial, por sua vez, compara modelos interpolados com um modelo de referência do depósito, de modo que o valor de C é determinado a partir da interpretação de seções representativas e julgamento do modelador, de modo que o intervalo de incerteza produzido seja razoável.

Na calibração total, demorada e laboriosa, utiliza-se inúmeros modelos de referência para a determinação do parâmetro C. Cada modelo de referência, gera um sistema de otimização para calcular o parâmetro C, sendo que uma única tentativa demanda da interpolação de todos os modelos de referência, a partir do mesmo parâmetro C. São necessárias múltiplas iterações usando diferentes valores para o parâmetro C, o que demanda de grande esforço computacional e eleva o tamanho e número de modelos de referência utilizados (Munroe e Deutsch, 2008).

Wilde e Deutsch (2011b) sugerem calibrar por um método semelhante ao *jackknife*, no qual apenas os dados são utilizados para calibrar o parâmetro C e reduz a demanda computacional. Para isso, um subconjunto dos dados é retirado antes do cálculo da função distância, o conjunto de dados *jackknife*. A função distância é calculado com o restante dos dados, e o resultado, utilizado para condicionar a interpolação. Posteriormente, o modelo classificado é comparado com o conjunto *jackknife*. O parâmetro C é ajustado até que a proporção desejada de dados *jackknife*, seja classificada corretamente como pertencente ou não ao domínio.

A Figura 3-9 ilustra a zona de incerteza para diferentes valores de C. O valor de 200 para o parâmetro C foi utilizado para modificar a função distância de modo a aumentar os valores positivos e diminuir os negativos. Valores da função distância maiores que 200 representam regiões fora do domínio, locais na cor branca, enquanto valores estimados menores que -200 representam regiões que certamente pertencem ao domínio da cor preta. A região de incerteza de cor cinza apresenta valores da

função distância entre -200 e 200. Nesta região, o limite entre domínios é estabelecido. O mesmo comportamento é observado para os demais valores de C, e a mudança no valor do parâmetro C cria tamanhos diferentes para a zona de incerteza cinza.

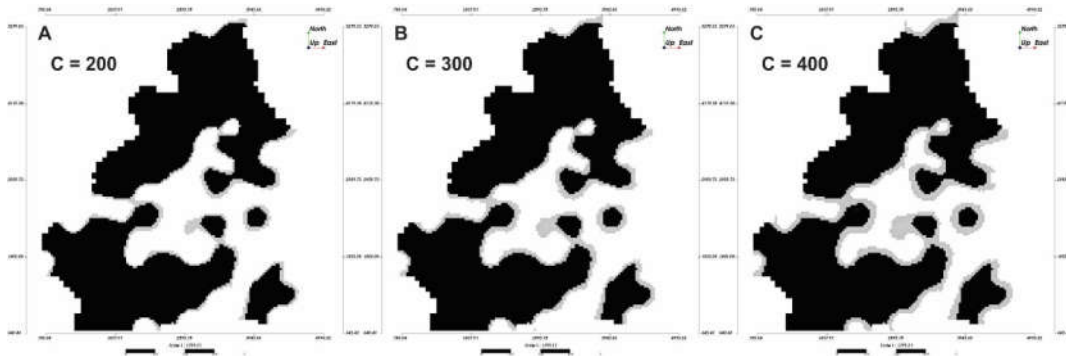


Figura 3-9: Zona de incerteza para diferentes valores do parâmetro C. A região preta está dentro do domínio, a região branca está fora do domínio e a região cinza representa a zona de incerteza.

A interpolação permite calcular para cada nó do grid os valores da função distância modificada. A zona de incerteza é determinada a partir dos locais que apresentam valores entre  $-C$  e  $+C$  no grid interpolado. Para obter contatos que sejam condizentes com o modelo, a simulação não condicional é realizada de maneira uniforme entre  $-C$  e  $+C$ . Caso o valor interpolado seja menor que o valor simulado para a função distância, o local é considerado pertencente ao domínio, caso o valor seja maior, o local é considerado externo ao domínio. Nos locais onde a interpolação apresenta o mesmo valor da simulação são estabelecidos os contatos dos domínios como esquematizado na Figura 3-10.

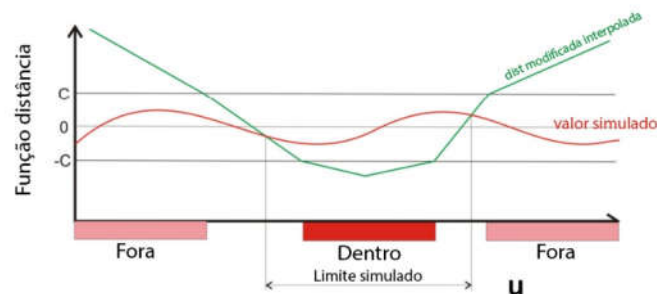


Figura 3-10: Classificação dos locais comparando valores estimados e simulados (Modificado de Wilde e Deutsch, 2011a)

Para que a simulação seja realizada de forma uniforme entre  $-C$  e  $+C$ , o desvio padrão,  $y'(u)$ , pode ser simulado e transformado pela relação:

$$df'(u) = 2 * C * G^{-1}(y'(u)) - C \quad \forall u, \forall l \quad (3-15)$$

na qual  $df'(u)$  é o valor da função distância simulada,  $y'(u)$  o valor normal padrão da simulação não-condicional, e  $G^{-1}$  representa a determinação do valor da distribuição

acumulada padrão normal correspondente a  $y'(u)$ . Para garantir que os valores pertençam a região estabelecida, os valores são multiplicados por  $2C$  e subtraídos de  $C$ .

A classificação do local  $u$  como pertencente ou não ao domínio é realizada ao comparar os valores interpolados com os valores simulados. O local pertencerá ao domínio caso o valor interpolado seja menor que o valor simulado, e em situações onde o valor interpolado é superior ao valor simulado o local não irá pertence ao domínio, de acordo com a relação:

$$i'(u) = \begin{cases} \text{pertencente, se } df'(u) < \widehat{df}^*(u) \\ \text{não pertencente, se } df'(u) \geq \widehat{df}^*(u) \end{cases} \quad (3-16)$$

no qual  $df'(u)$  é o valor da função distância simulada e  $\widehat{df}^*(u)$  é o valor da função distância interpolada.

Os contatos geológicos são simulados, desta forma é recomendado o uso de um variograma com modelo gaussiano para a simulação não-condicional. Também, é necessário o uso de um pequeno efeito pepita para estabilizar o cálculo matemático das matrizes de covariância necessárias na krigagem. O alcance do variograma gaussiano usado na simulação determina a natureza do contato entre os domínios, alcances menores geram contatos mais rugosos, enquanto alcances elevados determinam contatos mais suaves. Segundo Wilde e Deutsch (2011a), essa abordagem foi desenvolvida para casos binários em que o local  $u$  pertence ou não a um domínio, desta forma, em situações em que existem múltiplos domínios é possível utilizar de uma abordagem hierárquica para a construção de modelos geológicos.

A Figura 3-11 apresenta um exemplo da metodologia hierárquica em um depósito de cobre pórfiro composto de cinco domínios geológicos, nos quais três domínios representam rochas intrusivas, um domínio representa os óxidos, e o último, os sulfetos. As categorias foram agrupadas de modo a representar os controles estruturais dos litotipos, e como resultado, tem-se quatro novos bancos de dados codificados em indicadores seguindo a hierarquia apresentada na imagem à direita.

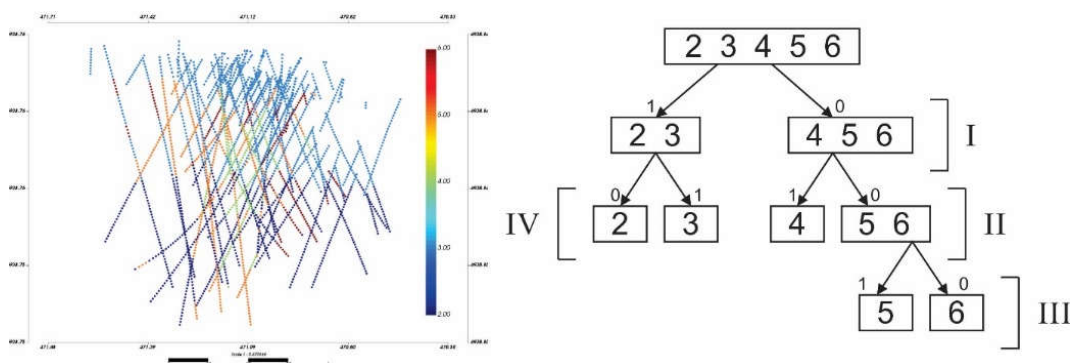


Figura 3-11: Depósito de cobre pórfiro. Na região esquerda da figura, é apresentada a localização das amostras e na região da direita o esquema dos grupos gerados pela hierarquia e seus respectivos indicadores.

Para determinar a incerteza associada, foi estabelecido empiricamente o valor 0.1 para o parâmetro C, a partir da malha amostral. As funções distância obtidas para cada novo banco de dados foram calibradas com o mesmo parâmetro C, e as distâncias obtidas interpoladas de acordo com cada categoria, e o menor valor de distância calculado, retidos e atribuídos a cada nó do grid. A região de incerteza no resultado da krigagem das distâncias, a partir da região entre os valores de  $-C$  e  $+C$ . A Figura 3-12 apresenta na parte inferior três realizações dos contatos gerados através da simulação não-condicional da região de incerteza, e a posterior classificação por comparação entre valores interpolados e simulados.

Para a construção do modelo geológico é necessário estabelecer regras de decisão para a hierarquização das categorias. No canto superior esquerdo da Figura 3-12, são apresentadas as regras de decisão para agrupar as categorias e montar as realizações do modelo. A região superior direita da Figura 3-12 apresenta a realização 16 da simulação como exemplo de resultado obtido para o modelo geológico. A diferença entre os domínios gerados por múltiplas simulações permite acessar a incerteza volumétrica estabelecida pelo método.

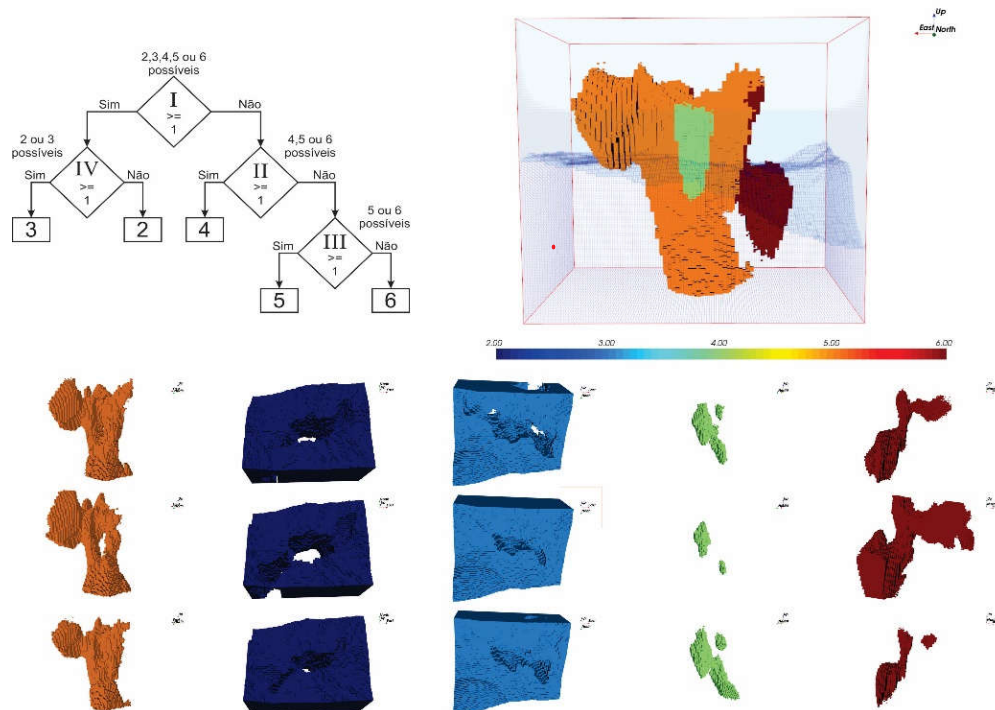


Figura 3-12: Construção do modelo geológico. No canto superior direito, realização 16 para o modelo geológico. No canto superior esquerdo, as regras estabelecidas para a construção dos modelos. Na região inferior da imagem, as realizações 2, 8 e 16 dos domínios geológicos para cada categoria. As categorias 2 à 6 estão ordenadas da esquerda para a direita.

### 3.3 Plug-in: *DFMOD C*

A metodologia proposta para acessar a incerteza do modelo geológico a partir do parâmetro C foi operacionalizada no *software* geostatístico SGeMS através de

dois *plug-ins* elaborados em linguagem *python*. Os códigos podem ser encontrados no Apêndice A, no Apêndice B e no repositório *online*:

<[https://github.com/FlavioAmarante/dfmod/tree/uncertainty\\_dfmod](https://github.com/FlavioAmarante/dfmod/tree/uncertainty_dfmod)>

A opção DFMOD do painel de algoritmos (Figura 3-13) contém quatro *plug-ins*: *signed distance*, *signed distance C*, *interpolator* e *classifier C*. Rollo (2017) foi responsável pelo desenvolvimento dos *plug-ins signed distance*, que calcula o valor da função distância assinalada para a variável categórica, e *interpolator*, responsável pela interpolação das funções distância para todo *grid*.

Os *plug-ins signed distance C* e *classifier C* são uma continuidade do trabalho desenvolvido anteriormente. O primeiro *plug-in* é uma variação do algoritmo *signed distance*, que calcula a função distância assinalada para a variável categórica, e modifica a função de acordo com o parâmetro C estabelecido. O segundo é responsável por interpolar, por krigagem ordinária, a função distância modificada para todo o *grid*, estabelecer a zona de incerteza a partir do parâmetro C, simular não-condicionalmente nesta região e classificar a região como pertencente ou não ao domínio.

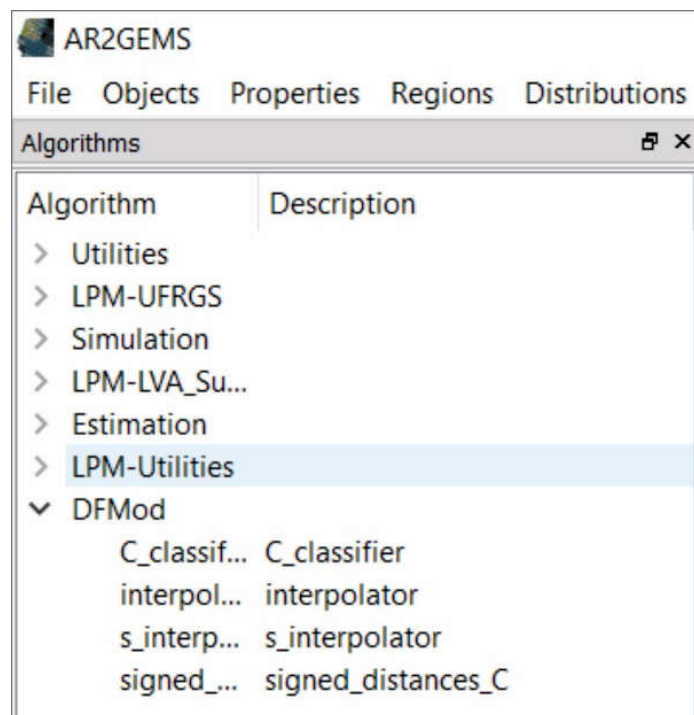


Figura 3-13: Imagem do menu com os algoritmos do software SGeMS e a opção DFMOD.

### 3.3.1. Signed Distance C

O *plug-in Signed Distance C* calcula para uma variável categórica o valor correspondente da função distância anisotrópica ou isotrópica. A distribuição da função distância é modificada pelo parâmetro C, o que possibilita gerar a zona de incerteza ao redor dos limites entre domínios. O valor categórico deve ser apresentado em caracteres numéricos.



Na Figura 3-14, o usuário deve selecionar, em 1, a propriedade que informa a litologia ou valor categórico de cada amostra. Em 2, o usuário imputa os ângulos de rotação e razões de anisotropia para o cálculo das distâncias anisotrópicas, o valor padrão calcula distâncias isotrópicas. O valor do parâmetro da incerteza C é selecionado em 3.

Figura 3-14: Plug-in *signed distances C*.

Como *output*, o *plug-in* gera uma propriedade `Signed_Distances_C_X_RT_Y` para cada litologia, onde X é o valor do parâmetro C e Y o algarismo que representa aquela litologia.

### 3.3.2. Classifier C

O *plug-in C\_classifier* é dividido em cinco abas: *general*; *variogram interpolation*; *simulation*; *variogram simulation* e *options*. A Figura 3-15-A apresenta a primeira aba, na qual o usuário deve imputar em 1 a propriedade categórica de interesse, na qual os blocos serão classificados. Em 2, o *grid* no qual as distâncias serão interpoladas e simuladas. O usuário deve imputar em 3 as distâncias assinaladas modificadas calculadas pelo *plug-in signed distance C*. O valor do parâmetro C é imputado em 4. Na última seção 5, o usuário deve imputar os parâmetros de busca da interpolação, número máximo e mínimo de dados e elipsoide de busca.

Na segunda aba, apresentada na Figura 3-15-B, em 6 devem ser os modelos variográficos referentes as distâncias assinaladas, na mesma ordem em que foram selecionados anteriormente. Considerando duas categorias 1 e 2, por exemplo, caso a categoria 1 seja selecionada primeiro em 3, ela também deve ser a primeira a ser selecionada em 6.



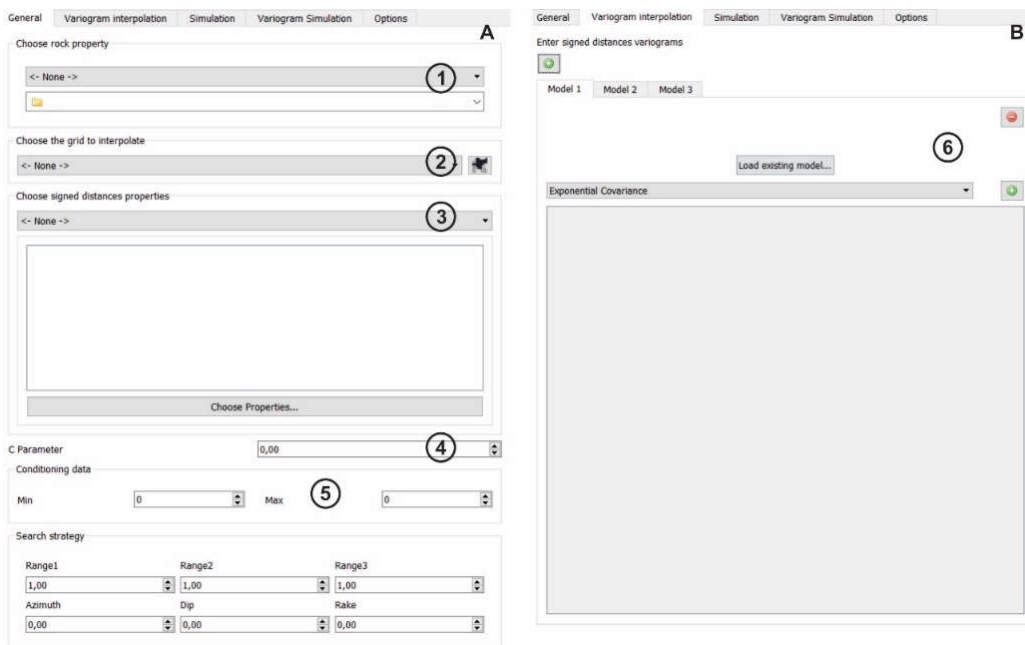


Figura 3-15: Plug-in *Classifier C*. Visão da aba *general* e da aba *variogram interpolation*.

A terceira aba é apresentada na Figura 3-16-A, e o usuário deve selecionar em 7 o número de realizações a serem geradas na simulação e imputar os parâmetros de busca em 8. Em 9, será selecionado o número de processadores utilizados. A semente da simulação, o caminho aleatório da simulação e a semente do caminho serão selecionados em 10, 11 e 12, respectivamente.

Em 12, na quarta aba (Figura 3-16-B), são informados os modelos variográficos, referentes as distâncias assinaladas utilizados na simulação. A ordem de seleção para as distâncias assinaladas deve ser respeitada, desta forma o primeiro modelo variográfico adicionado em 12 deve estar relacionado a primeira distância assinalada selecionada em 3. Na aba opções de número 13 (Figura 3-16-C), é selecionado se a interpolação e a simulação devem ser mantidas ou descartadas.

Como output, o plug-in gera, caso nenhuma opção da aba *options* tenha sido selecionada, uma propriedade com o nome *Class\_X\_C\_Y*, onde X é o nome da função distância e Y o valor do parâmetro C. Esse é o modelo binário classificado a partir da interpolação da função distância e a simulação não condicional. A zona de incerteza é obtida a partir do valor do parâmetro de incerteza, representada pela região construída com o nome *UZ\_C\_X*, na qual X representa o valor do parâmetro C. Ao marcar a opção *keep interpolation*, o modelo interpolado não é descartado, e caso a opção *keep simulation* seja selecionada, as realizações da simulação não serão descartadas.

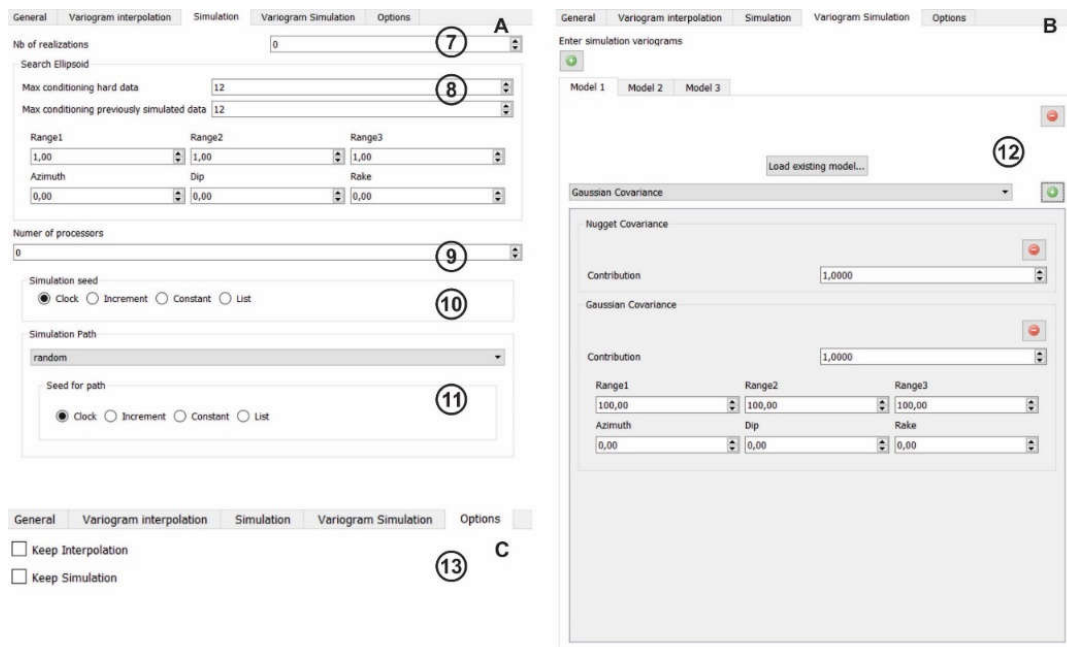


Figura 3-16: Plug-in *Classifier C*. Visão da aba *simulation*, da aba *variogram simulation* e da aba *options*.

Os plug-ins apresentados permitem operacionalizar a metodologia do parâmetro da incerteza C para bancos de dados binários. Entretanto, a maioria dos bancos de dados geológicos apresentam diversas categorias e para utilizar os plug-ins para múltiplas categorias é necessário utilizar a abordagem hierárquica. Para isso, são estabelecidas regras com o objetivo de dividir o banco de dados em subgrupos e o plug-in *Signed Distance C* é utilizado para calcular as distâncias assinaladas modificadas pelo parâmetro C para cada subgrupo.

Os subgrupos e seus respectivos variogramas são adicionados em ordem ao plug-in Classifier, e como resultado, o plug-in retorna as realizações classificadas para cada par de categorias. Estabelecidas as regras de hierarquização do modelo geológico, é possível utilizar a equação apresentada no Apêndice 3 para unir os domínios geológicos e obter múltiplas realizações para o modelo geológico.

## 4. ESTUDOS DE CASO

As três metodologias apresentadas no Capítulo 3 deste trabalho foram aplicadas a um banco de dados real, proveniente de uma mineradora de ferro de grande expressão nacional e mundial. Os modelos gerados pelos métodos foram comparados ao modelo determinístico híbrido gerado em parte por métodos implícitos e parte por digitalização manual de polígonos em seções, utilizadas posteriormente na construção dos sólidos que representam os domínios geológicos.

Os modelos obtidos pela simulação de cada método foram comparados, considerando a variabilidade dos domínios obtida, os mapas de probabilidade de cada categoria e a comparação visual de seções entre o modelo de referência e uma realização obtida por cada metodologia. Dentre os métodos, foi selecionado aquele que melhor representou a incerteza volumétrica para a construção do modelo final.

### 4.1 Banco de dados

O banco de dados utilizado nos estudos de caso é proveniente de um depósito de ferro de grande relevância mundial e considerado atualmente um dos maiores depósitos em escala global. As equipes de geologia de curto prazo, geotecnia e planejamento dessa mina definiram as litologias como pertencentes a dois grandes grupos: as tipologias de minério e as tipologias de estéril. Os litotipos pertencentes ao minério são a canga estrutural (CE), a hematita friável (HF), a hematita compacta (HC) e a hematita magnanesífera (HM), enquanto os litotipos estéreis são a canga química (CQ), o jaspelito (JP), a máfica decomposta (MD), a máfica semidecomposta (MSD) e a máfica sã (MS). Esses litotipos foram definidos considerando as características litológicas e estruturais que controlam a mineralização. O banco de dados possui 6924 amostras, provenientes de 718 furos de sondagem, ao longo de uma região de 14.464.890 m<sup>2</sup> e profundidade atingindo até 659 metros.

Os diferentes litotipos presentes no banco de dados foram agrupados em quatro categorias principais que representam as principais características do depósito: hematita na categoria 1, canga estrutural na categoria 2, jaspelito na categoria 3 e estéril franco na categoria 4. A Figura 4-1 apresenta a disposição dos dados provenientes de furos de sondagem.

O modelo de referência determinístico utilizado foi construído a partir de um método misto que combina métodos de estimativas de variáveis categóricas e modelagem explícita em três dimensões. As variáveis categóricas advêm de informações diretas como sondagem e amostras de frente de lavra, e indiretas, como seções interpretadas e mapas geológicos. Durante a modelagem, foram construídas seções verticais e/ou horizontais a partir dos dados categóricos levantados, e posteriormente, estimados em um espaço tridimensional (modelo de blocos) a partir da krigagem dos indicadores. Os parâmetros de grid do modelo geológico de referência são apresentados na Tabela 4-1.

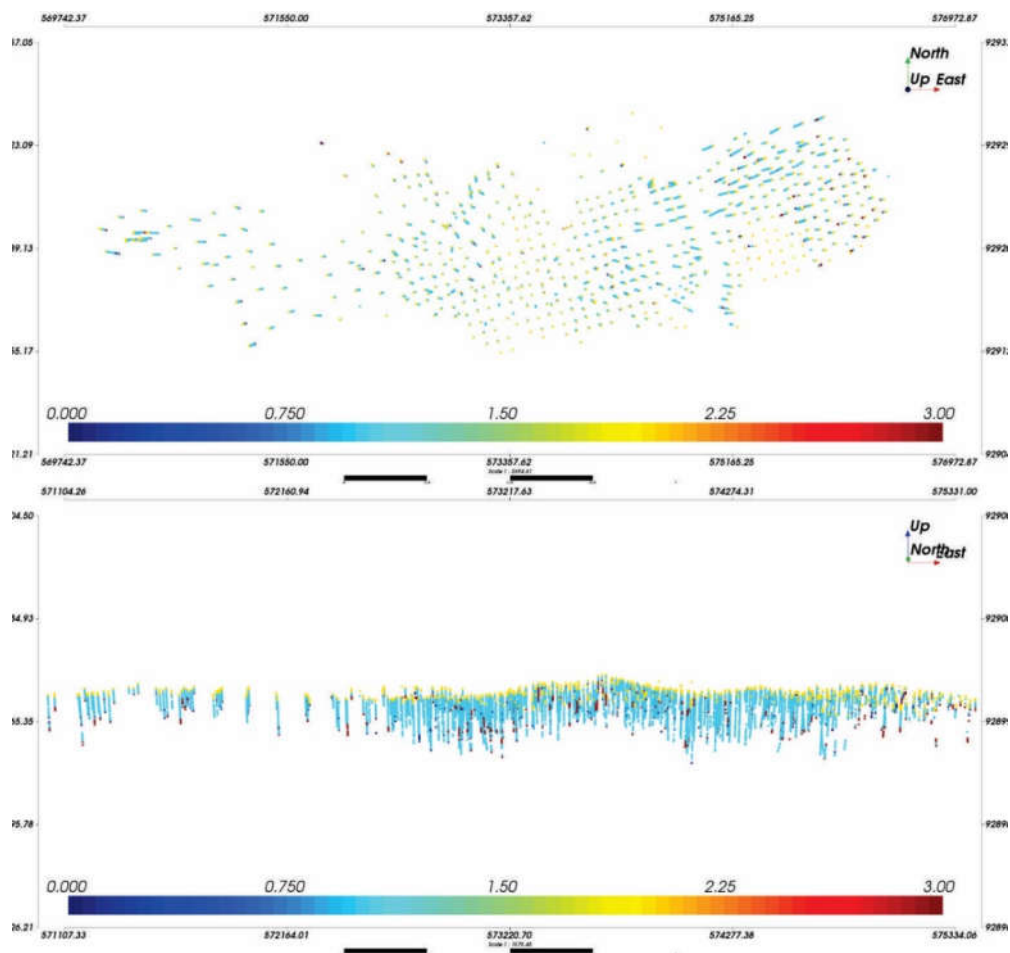


Figura 4-1: A figura apresenta a localização das amostras, a imagem da região superior apresenta a vista em planta dos furos de sondagem. A imagem inferior apresenta a vista em perspectiva dos dados provenientes de furos de sondagem. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

Os litotipos presentes no modelo determinístico foram agrupados da mesma forma que os dados provenientes de furos de sondagem. As figuras 4-2 e 4-3 apresenta o modelo de referência Lito4 com quatro categorias utilizado na validação dos modelos obtidos pelos diferentes métodos propostos e como imagem de treinamento no método contactsim de MPS.

Tabela 4-1: Grid do modelo geológico base.

	Min	Max	Tamanho dos blocos	Número de blocos	Dimensão
X	569.510	577.010	25	300	7.500
Y	9.290.885	9.293.510	25	105	2.625
Z	225	900	15	45	675

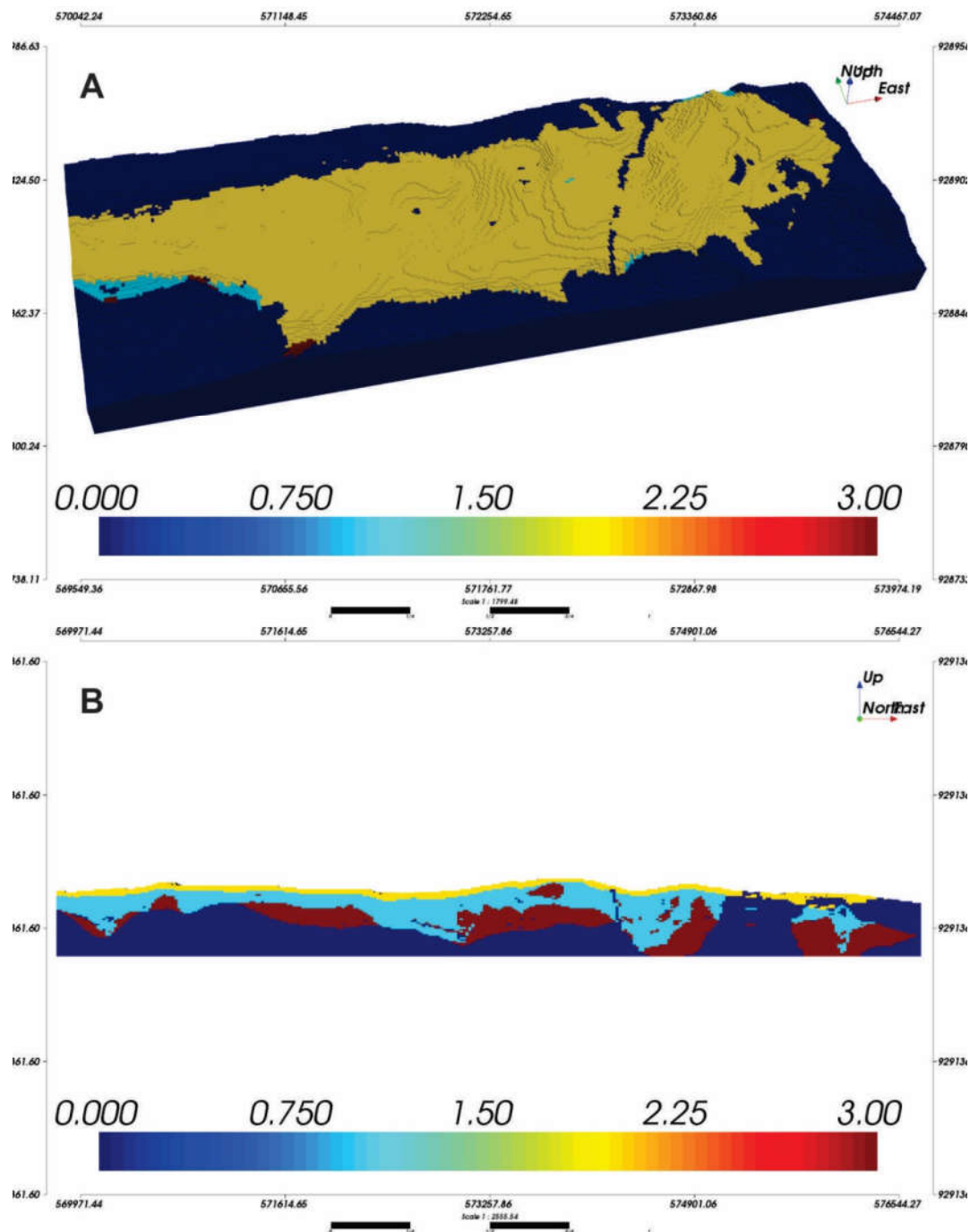


Figura 4-2: A figura apresenta o modelo Lito 4 do depósito de ferro S11D. Na imagem superior A, é apresentado o modelo geológico completo. A imagem B apresenta a seção geológica no eixo Y corte 75 do modelo. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estereis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

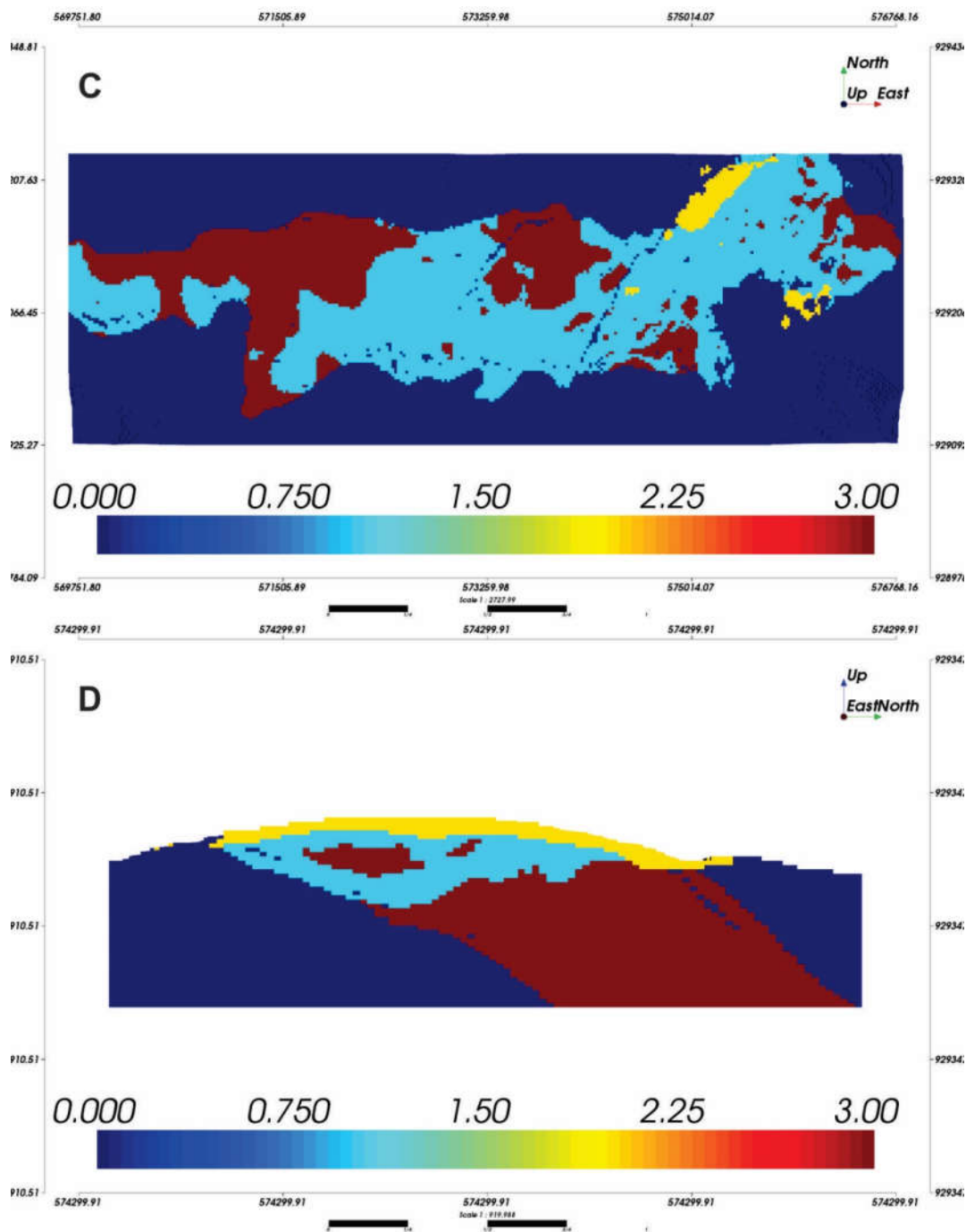


Figura 4-3: A figura apresenta o modelo Lito 4 do depósito de ferro S11D. Na imagem C, está representado o corte 15 em planta do modelo e na imagem D a seção norte-sul corte 140 do mesmo modelo. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

## 4.2 Contactsim (MPS)

A primeira metodologia desenvolvida nesse trabalho fundamenta-se na quantificação da incerteza de modelos geológicos a partir da aplicação do algoritmo de geoestatística multiponto *contactsim* (Boucher *et al.*, 2014).

A simulação conduzida por essa metodologia tem por objetivo avaliar a incerteza geológica a partir da geoestatística multipontos. Portanto, serão geradas múltiplas realizações dos domínios geológicos apoiadas nas informações disponíveis para acessar a incerteza dos limites entre domínios.

Para aplicar o método, foi necessário transformar a categoria dos estéreis de valor 4 para 0, como requisitado pelo algoritmo implementado no *software* SGeMS (Figura 4-4 A e B). A construção dos múltiplos cenários pelo método *contactsim* utilizou do modelo determinístico de referência como imagem de treinamento. Ela é composta de quatro litologias representadas pelos valores categóricos de 0 a 3, da mesma forma que os dados categóricos (Figura 4-4 C e D). Os resultados obtidos foram comparados com o modelo de referência Lito4 e com os demais métodos de modelagem implícita. Desta forma, foi possível avaliar se as estruturas geológicas foram reproduzidas satisfatoriamente nas realizações obtidas na simulação e quantificar a incerteza associada.

### *Zona de incerteza e contatos*

A incerteza dos limites entre domínios geológicos pode ser acessada ao delimitar uma região em que a ocorrência do contato seja provável, e obter múltiplos cenários possíveis para a localização do contato. Essa região de incerteza é delimitada a partir do contato do modelo de referência e baseada na distância entre as amostras. Quatro distâncias para zonas de incerteza foram testadas: 25, 50, 75 e 100 metros. A zona de incerteza para 100 m foi selecionada para representar a incerteza, já que permitiu uma maior variabilidade quando comparada ao modelo de referência. Zonas de incerteza maiores foram testadas, porém geram impactos na região onde existe certeza no modelo de referência, o que torna a zona de incerteza de 100m baseada na distância amostral a melhor alternativa.

Na região superior da Figura 4-5, são representadas as zonas de incerteza construídas ao se erodir o modelo de referência em 100 metros a partir dos contatos entre domínios, e os blocos que complementam o modelo e que farão parte das realizações obtidas no final do método.

O algoritmo *contactsim* particiona a zona de incerteza em grupos de contatos semelhantes. O contato entre a hematita e o jaspelito, por exemplo, é determinado como pertencente a um grupo, enquanto o contato entre a canga e a hematita, pertencerá a outro grupo. Os padrões de cada grupo são armazenados na árvore de busca em cada grupo, para serem usados posteriormente. A Figura 4-6, apresenta os 11 grupos de diferentes tipos de contatos gerados no modelo de partição da zona de incerteza.

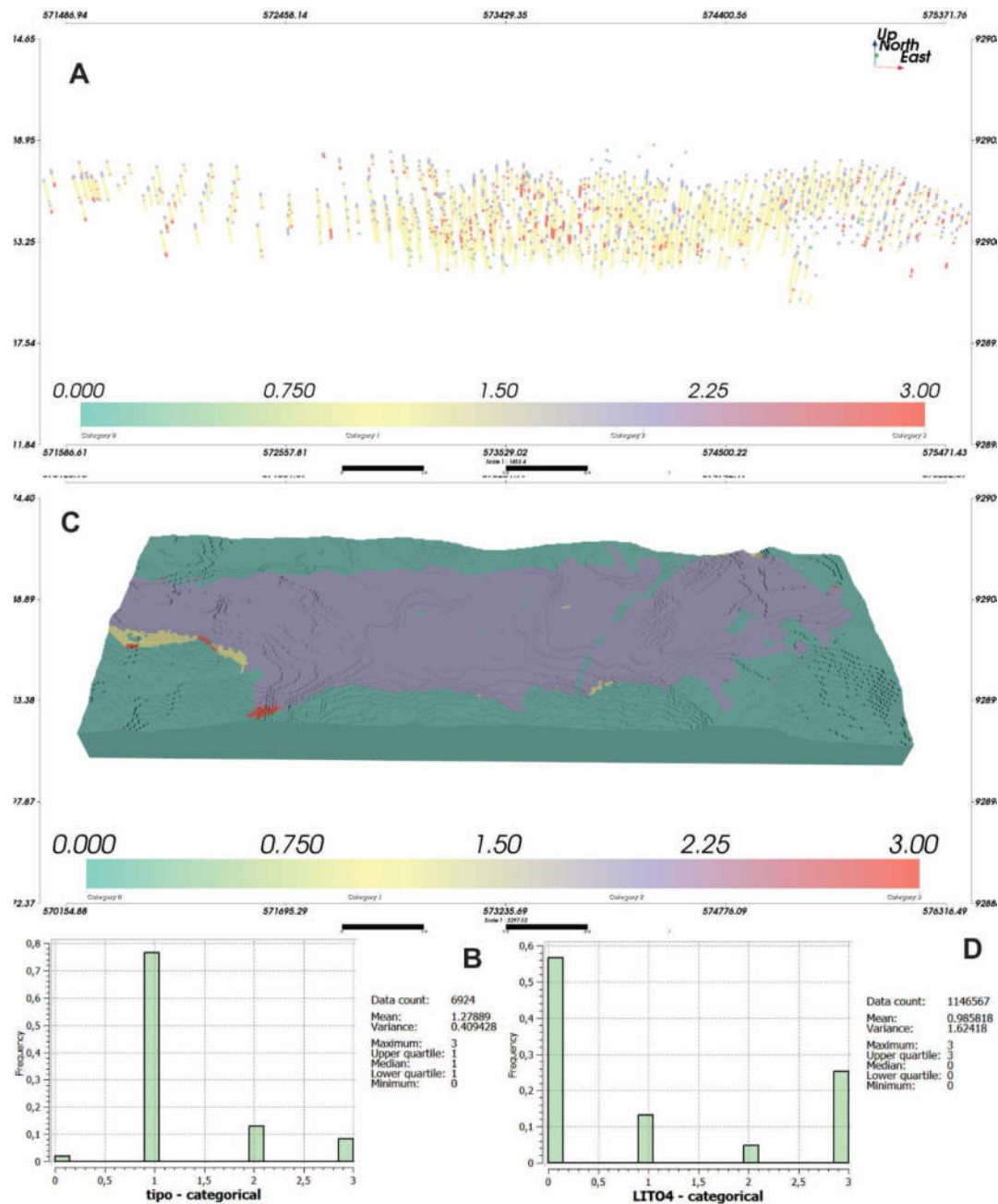


Figura 4-4: A figura apresenta os dados categóricos utilizados ao aplicar o algoritmo contactsim de MPS. A imagem A apresenta a localização dos dados provenientes de furos de sondagem. A imagem C apresenta o modelo de referência utilizado como imagem de treinamento. As imagens B e D apresentam os histogramas dos dados e do modelo de referência, respectivamente. Nas imagens, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estêreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.



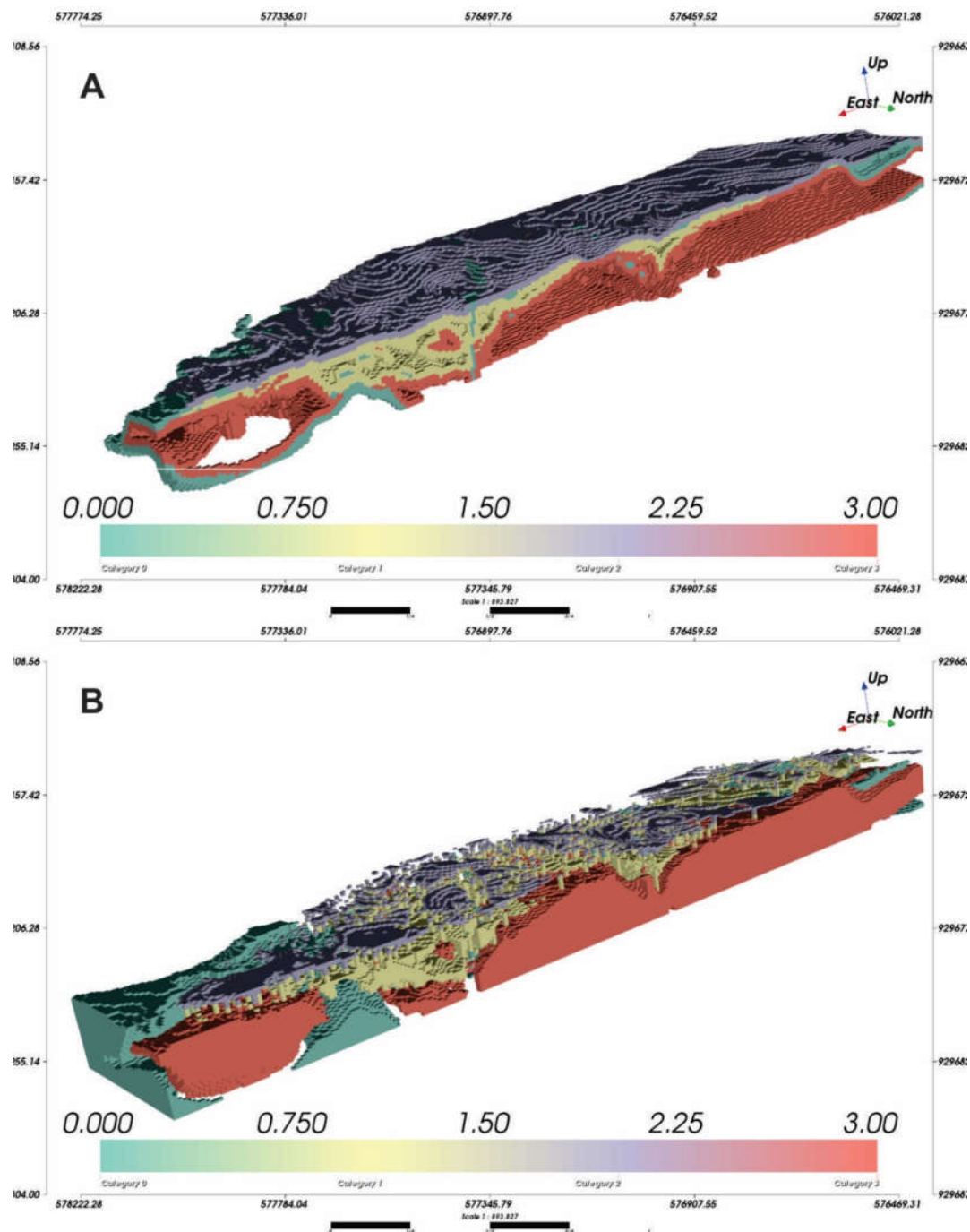


Figura 4-5: A figura apresenta a zona de incerteza para 100m construída pelo algoritmo *contactsim* na imagem A e o complemento da zona de incerteza na imagem B. Nas imagens, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estêreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

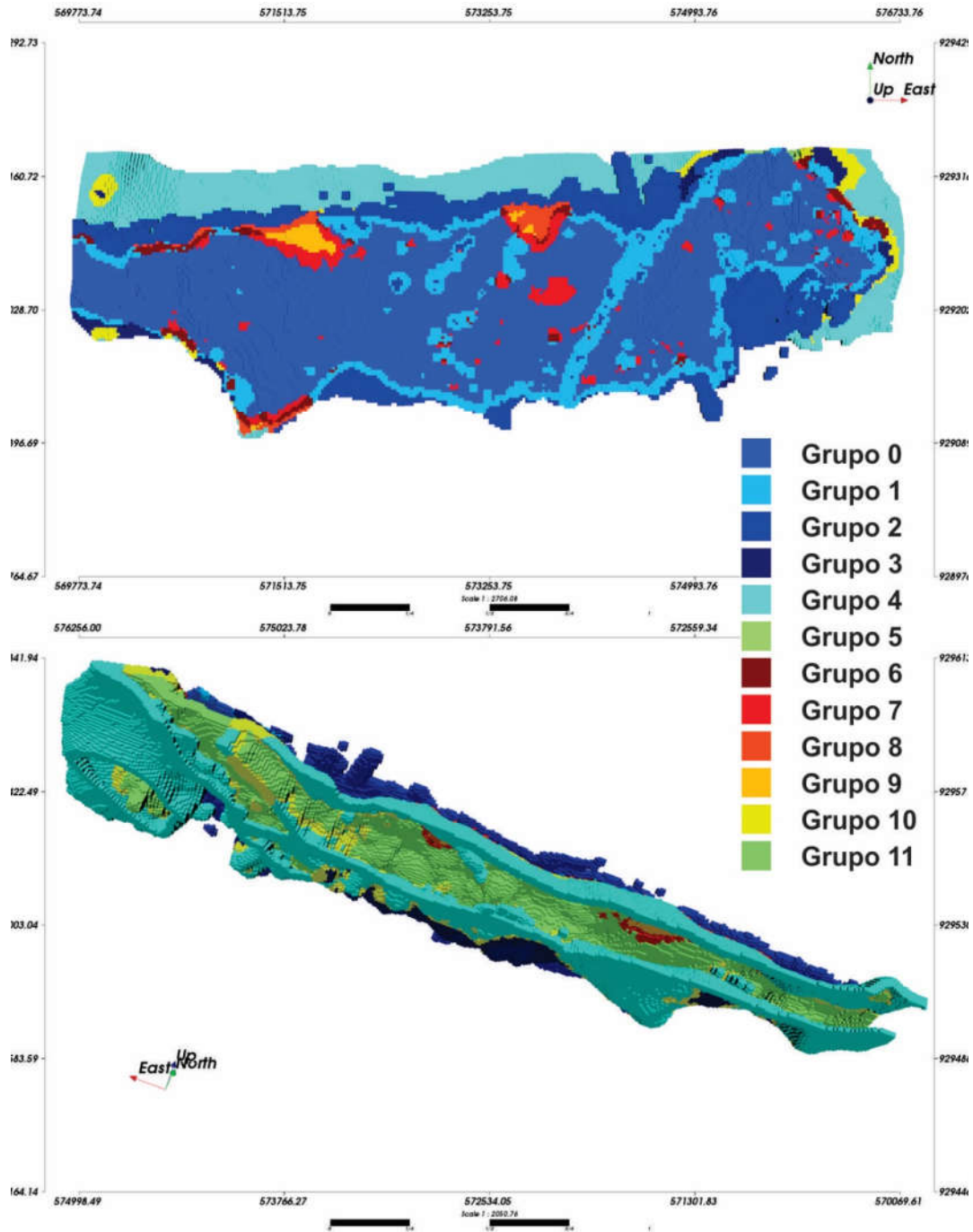


Figura 4-6: A figura exibe a partição em grupos dos tipos de contatos entre domínios. Na imagem superior, vista em planta da zona de incerteza dividida nos respectivos grupos e na imagem inferior vista em perspectiva. Nas imagens, é possível identificar os 11 grupos de contatos dos diferentes tipos de contatos entre categorias. As cores de cada grupo são apresentadas na escala de cores, a cor vermelho escuro, por exemplo, representa o grupo 6.

### *Simulação dos contatos*

A simulação das categorias foi limitada a região de incerteza, ou seja, a região próxima aos contatos geológicos. Ao utilizar o algoritmo *contactsim*, é necessário a seleção de alguns parâmetros como as dimensões da zona de incerteza, o número de realizações, o modelo de blocos e os dados condicionantes. Como discutido anteriormente, a distância de 100 m foi selecionada para a construção da zona de incerteza em todas as direções. Durante a simulação, foram geradas 50 realizações a partir dos dados de furos de sondagem e do modelo de referência Lito-4. A Tabela 4-2 apresenta as propriedades do grid utilizado na simulação.

Tabela 4-2: Propriedades do grid de simulação.

	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Tamanho dos blocos</b>	<b>Número de blocos</b>	<b>Dimensão</b>
<b>X</b>	569.504	577.004	12,5	600	7500
<b>Y</b>	9.290.879	9.293.504	12,5	210	2625
<b>Z</b>	221	896	7,5	90	675

Os resultados obtidos na simulação da zona de incerteza para 100 m foram comparados com as realizações da zona de incerteza de 50 m, e apresentaram pouca variação em relação ao modelo de referência. Desta forma, a zona de incerteza de 100 m foi selecionada para caracterizar a incerteza do modelo. A Figura 4-7 apresenta quatro realizações obtidas na simulação das distâncias assinaladas. As figuras 4-8, 4-9, 4-10 e 4-11 apresentam quatro realizações para as categorias 0, 1, 2 e 3, simuladas na zona de incerteza. As imagens demonstram a variabilidade entre realizações obtida na simulação, a figura 4-8, por exemplo, apresenta quatro realizações da categoria 0.

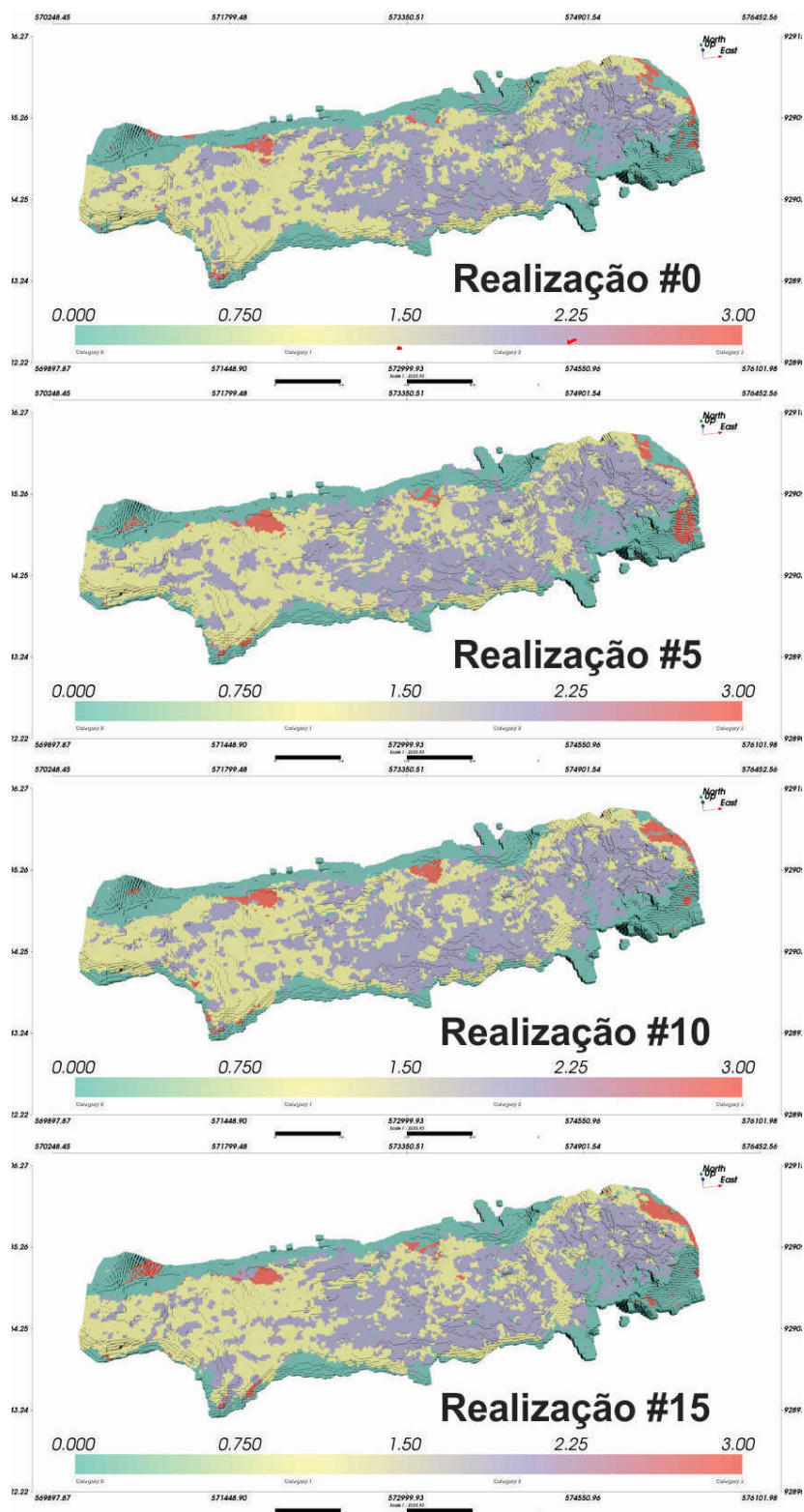


Figura 4-7: A figura exibe as realizações 0, 5, 10 e 15 da zona de incerteza de 100m obtidas através da simulação. Nas imagens, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estereis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. Note a diferença visual entre as proporções gerais de cada realização.

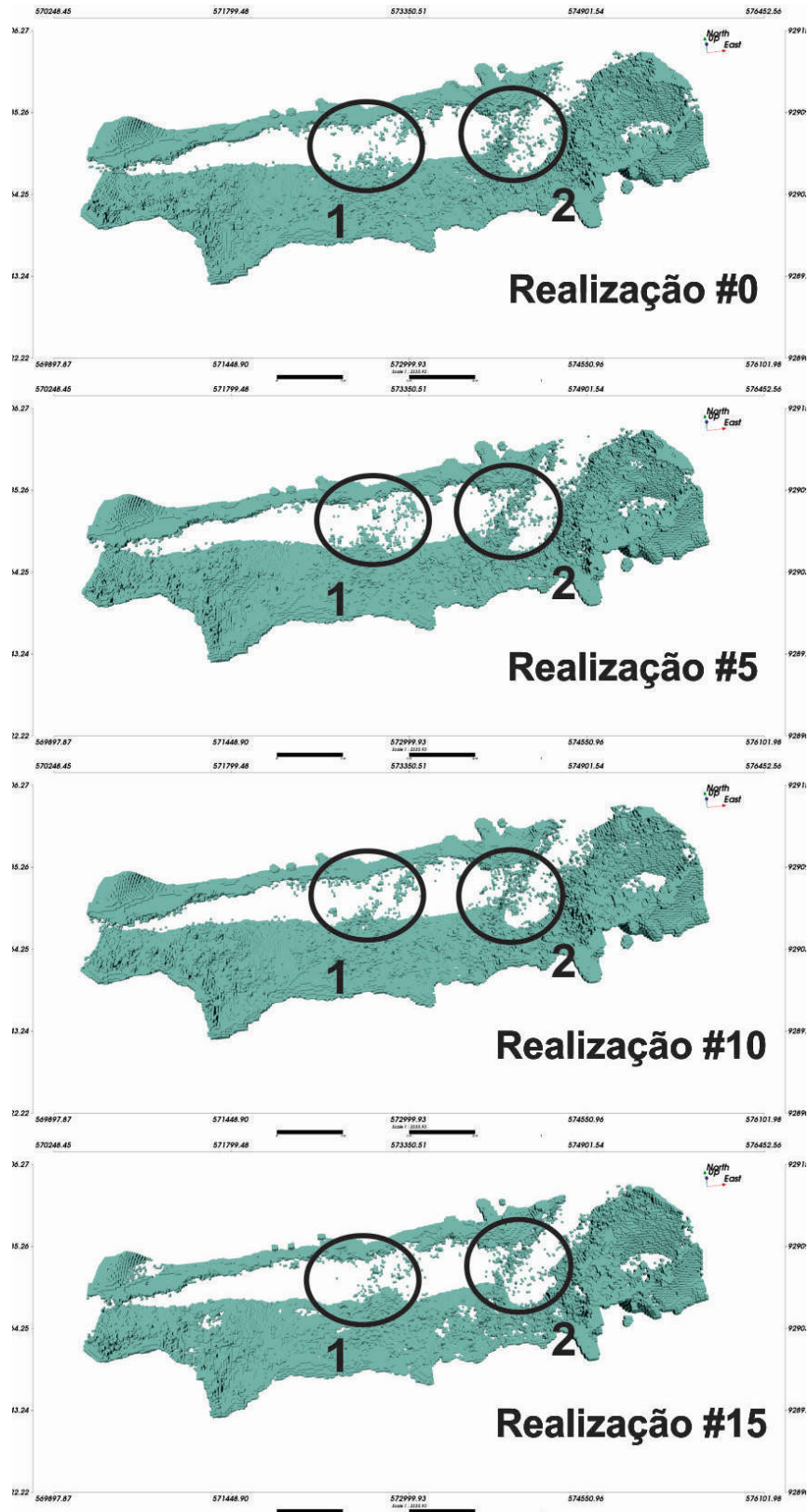


Figura 4-8: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 0 dos estêreis da cor verde escura. Note em 1 a variabilidade das intrusivas presentes no modelo. Ao comparar as realizações em 2 fica evidente a variabilidade do volume da falha preenchida por intrusivas.



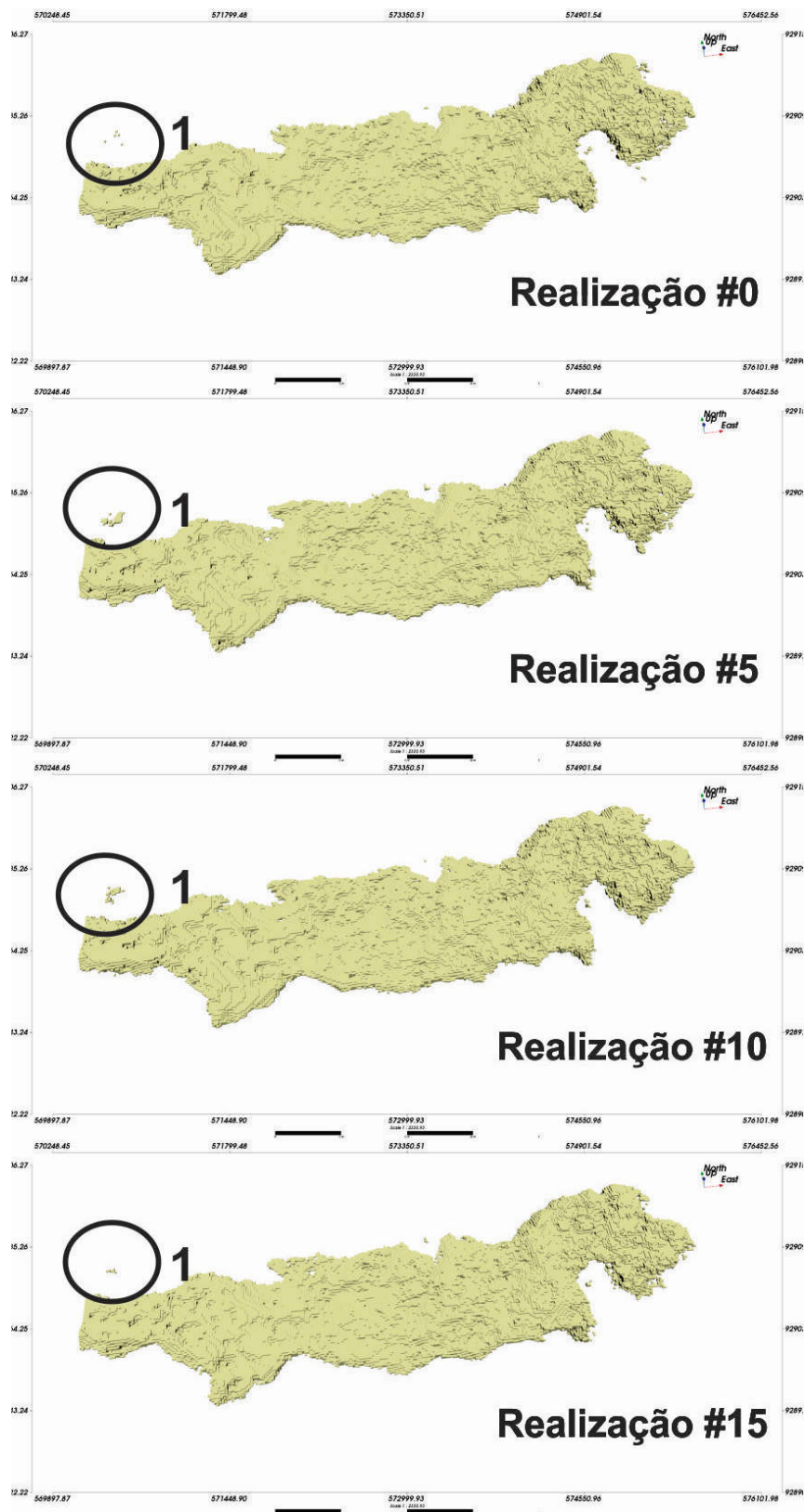


Figura 4-9: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 1 da hematita na cor amarela. Note a variabilidade do volume do conjunto de blocos dispersos da hematita.

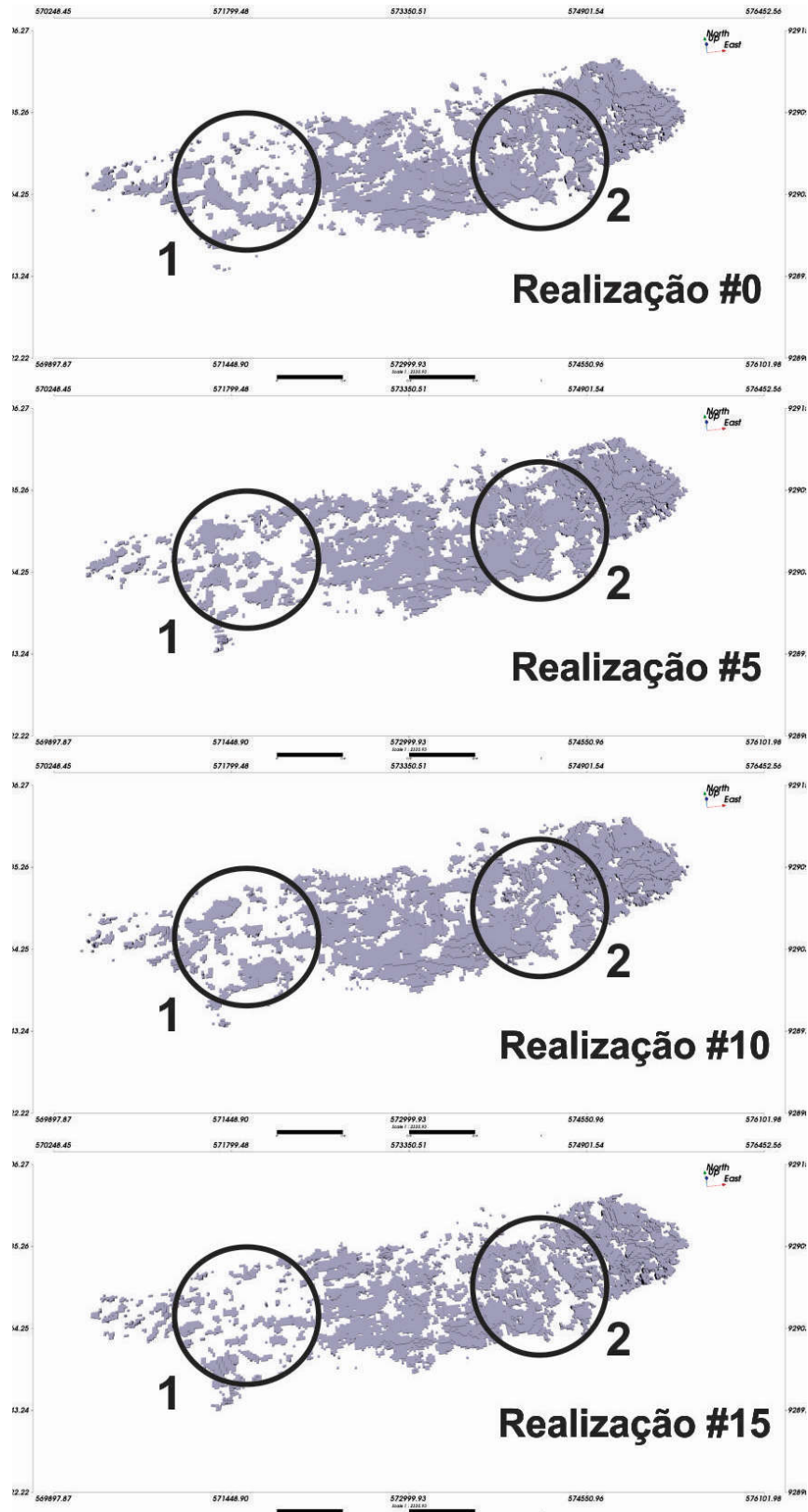


Figura 4-10: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e15 da categoria 2 da canga superficial da cor roxa. Note em 1 a variabilidade em volume dos blocos dispersos da canga, o domínio apresenta baixa continuidade espacial. A variabilidade da continuidade do domínio é apresentada em 2.

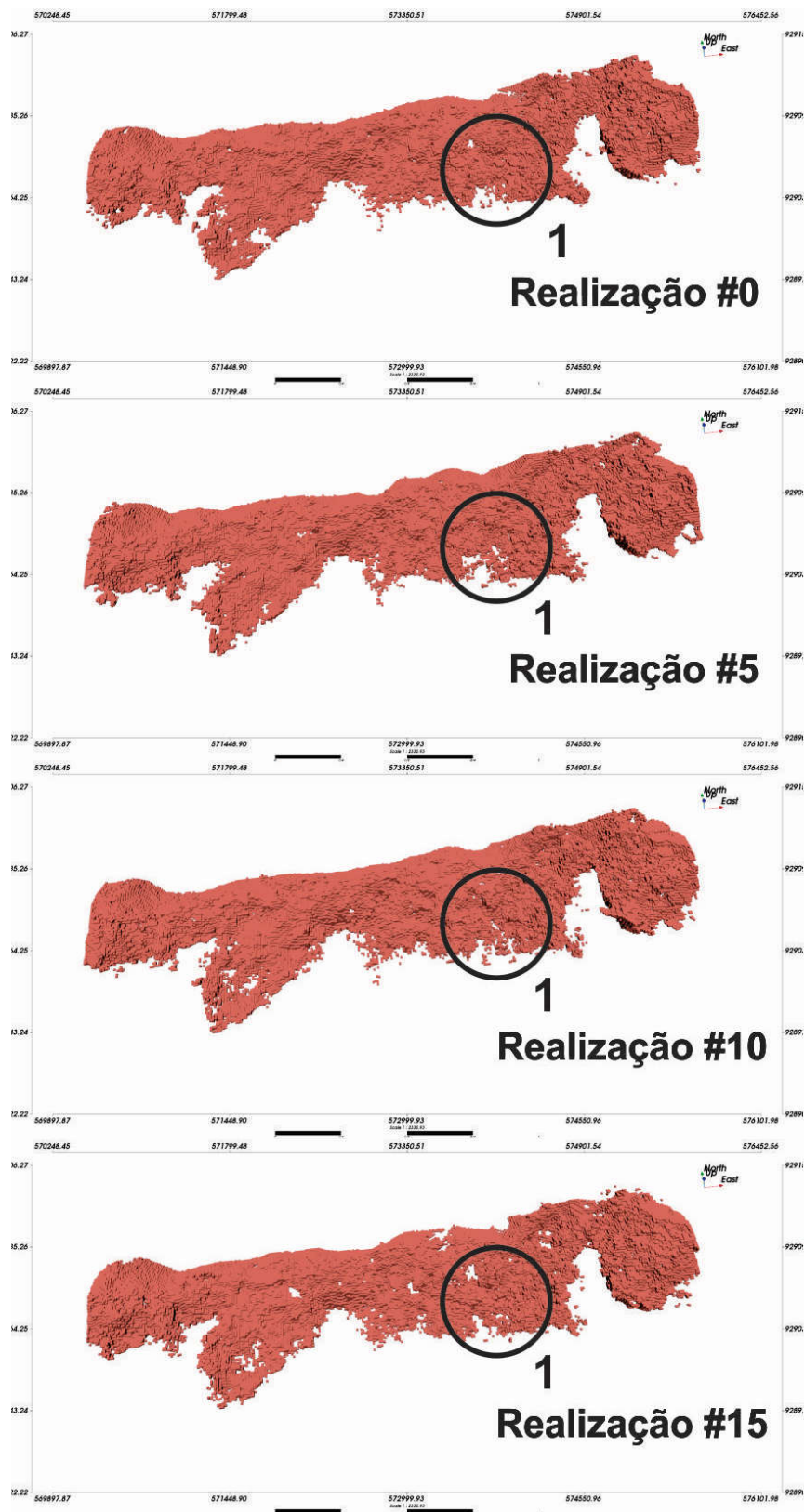


Figura 4-11: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e15 da categoria 3 dos jaspelitos na cor vermelha. Note em 1 a mudança na quantidade de blocos contínuos formando o domínio dos jaspelitos.



### *Pós-processamento e validação das realizações*

Os resultados obtidos na simulação foram visualmente satisfatórios, reproduzindo de modo realístico os domínios de cada categoria. Estes resultados obtidos na simulação foram confrontados com as amostras para confirmar que as realizações honram os dados. Na Figura 4-13, é apresentada a realização 5 que demonstra que de modo geral, a partir das três seções leste-oeste e duas seções norte-sul, que os dados categóricos utilizados foram respeitados. Note nas seções 60, 120 e 180 em Y os locais marcados pelos círculos 1, 2 3, e 4, nestes locais fica evidente que os dados foram honrados durante a simulação. Considerando as seções 100 e 300 em X os locais marcados em 5 e 6 confirmam que os dados dos furos de sondagem são concordantes com as realizações.

As 50 realizações obtidas na simulação foram validadas a partir da comparação das distribuições de cada categoria com o modelo de referência Lito4, o mesmo utilizado como imagem de treinamento. Os resultados das proporções são apresentados na Figura 4-12, na qual é possível identificar flutuações entre as proporções de cada categoria. A categoria 2 da canga superficial apresentou a maior discrepância em comparação ao modelo de referência sendo subvalorizada na maior parte das realizações obtidas.

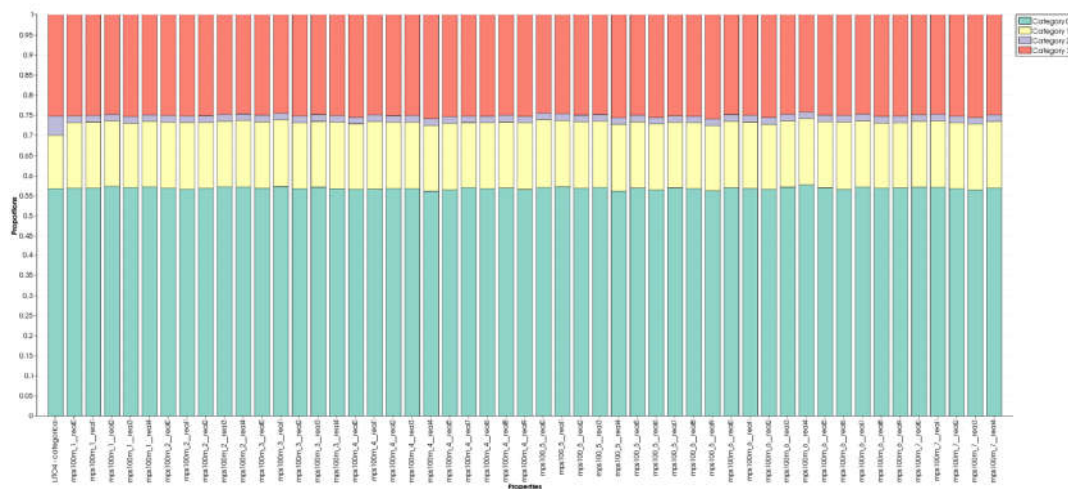


Figura 4-12: Comparação entre a proporção das 50 realizações obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência. Na imagem a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

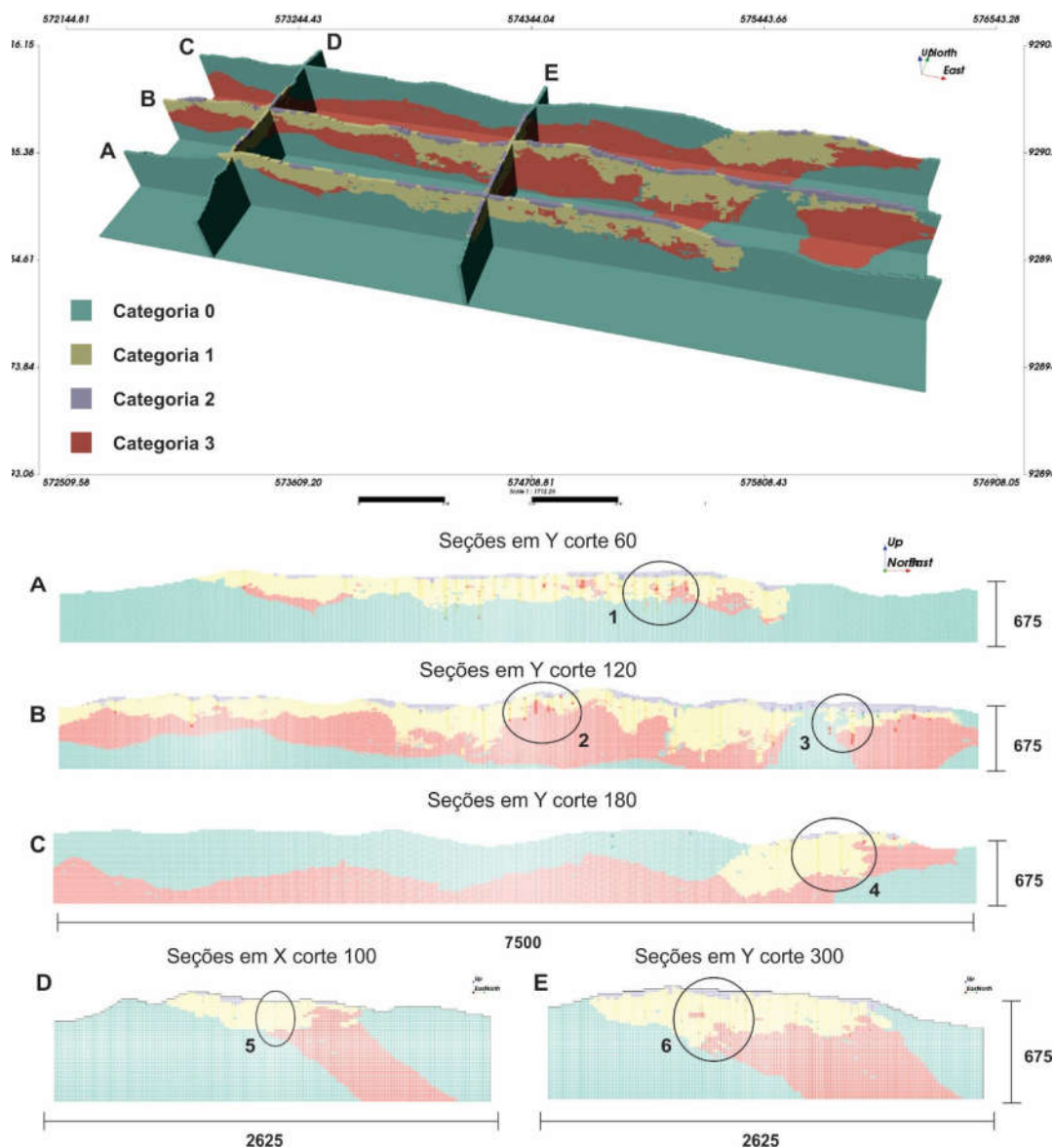


Figura 4-13: A imagem apresenta as seções verticais da realização 5 evidenciando que os dados foram honrados. Seções Leste-Oeste nos cortes 60, 120 e 180 do modelo de blocos de A a C, evidenciando nas regiões demarcadas por círculos 1, 2, 3 e 4 que os dados são respeitados na simulação. Seções norte-sul nos cortes 100 e 300 do modelo de blocos em D e E, comprovando que os dados foram honrados. Note as regiões 5 e 6 que demonstram q os dados foram respeitados durante a simulação. Nas imagens, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor cinza a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

### 4.3 Modelos implícitos

As técnicas de modelagem geológica implícita têm por objetivo fornecer modelos objetivos, flexíveis e que permitem a sua reprodução quando necessário. Os dois estudos de caso que serão apresentados se baseiam em funções distâncias calculadas para cada amostra e a posterior definição de diferentes isosuperfícies a partir desta função. Diversas realizações para os limites entre domínios são construídas. Usou-se duas metodologias para construir esses modelos. A primeira consiste em simular as distâncias assinaladas na região de interesse. A segunda consiste em definir uma região de incerteza a partir da interpolação das distâncias assinaladas, simular de modo não-condicional nessa região e, posteriormente, extrair as isosuperfícies ao comparar a simulação e a interpolação.

#### 4.3.1. Simulação da função distância (SD sim.)

A simulação da função distância apresentada no Capítulo 3 foi aplicada ao banco de dados de ferro. O banco de dados utilizado é composto de dados provenientes de furos de sondagem e dados de seções geológicas no total de 51160 amostras. Desta forma, foram adicionados dados de seções interpretadas a partir dos dados originais de furos de sondagem para compor o banco de dados utilizado na aplicação do método. As diversas litologias encontradas foram agrupadas em quatro categorias de interesse: estéril, canga, hematita e jaspelito. A Figura 4-15 apresenta a distribuição espacial das amostras do banco de dados utilizado e a Figura 4-14 apresenta a proporção de cada categoria no banco de dados.

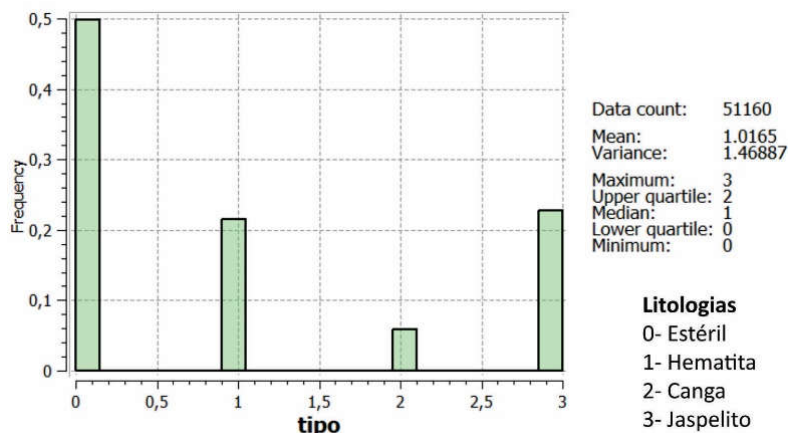


Figura 4-14: Histograma categórico litologias. No histograma a categoria zero representa os estéreis, a categoria 1 representa a hematita, a categoria 2 representa a canga superficial e a categoria 3 representa os jaspelitos.

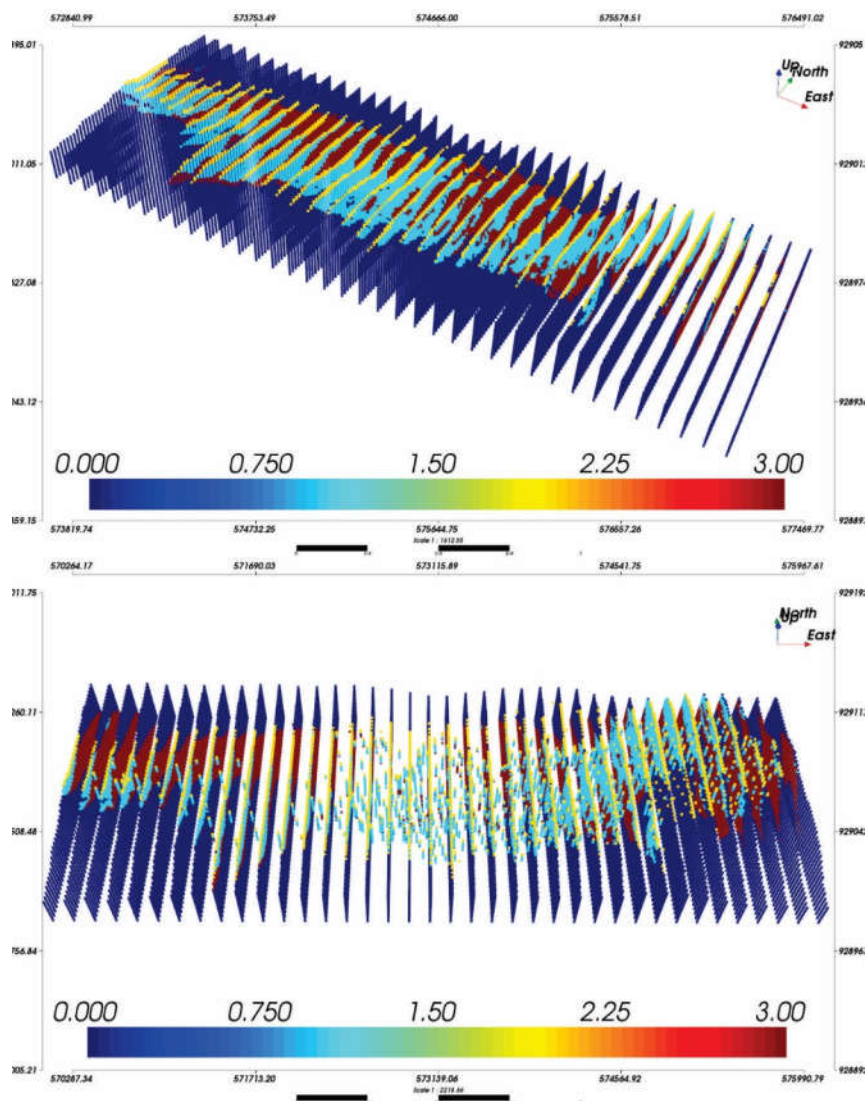


Figura 4-15: A figura exibe o banco de dados utilizado ao aplicar os métodos implícitos. O banco de dados é composto de dados provenientes de furos de sondagem e dados obtidos a partir das seções geológicas interpretadas. A imagem superior apresenta as seções geológicas interpretadas adicionadas ao banco de dados original e a imagem inferior apresenta o banco de dados completo em perspectiva. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

#### *Cálculo das distâncias*

A Figura 4-16 apresentada abaixo apresenta as distâncias assinaladas calculadas para cada uma das litologias, portanto os valores da legenda representam essa variação considerando valores negativos como pertencentes ao domínios de interesse e valores positivos como externos ao domínio. Por consequência, os valores muito negativos de coloração azul representam regiões dentro do domínio e cores avermelhadas quentes representam amostras fora do domínio de interesse. A transição entre as cores escuras azuladas para cores avermelhadas representa a distância calculada e a proximidade entre um tipo indicador e o tipo indicador distinto.

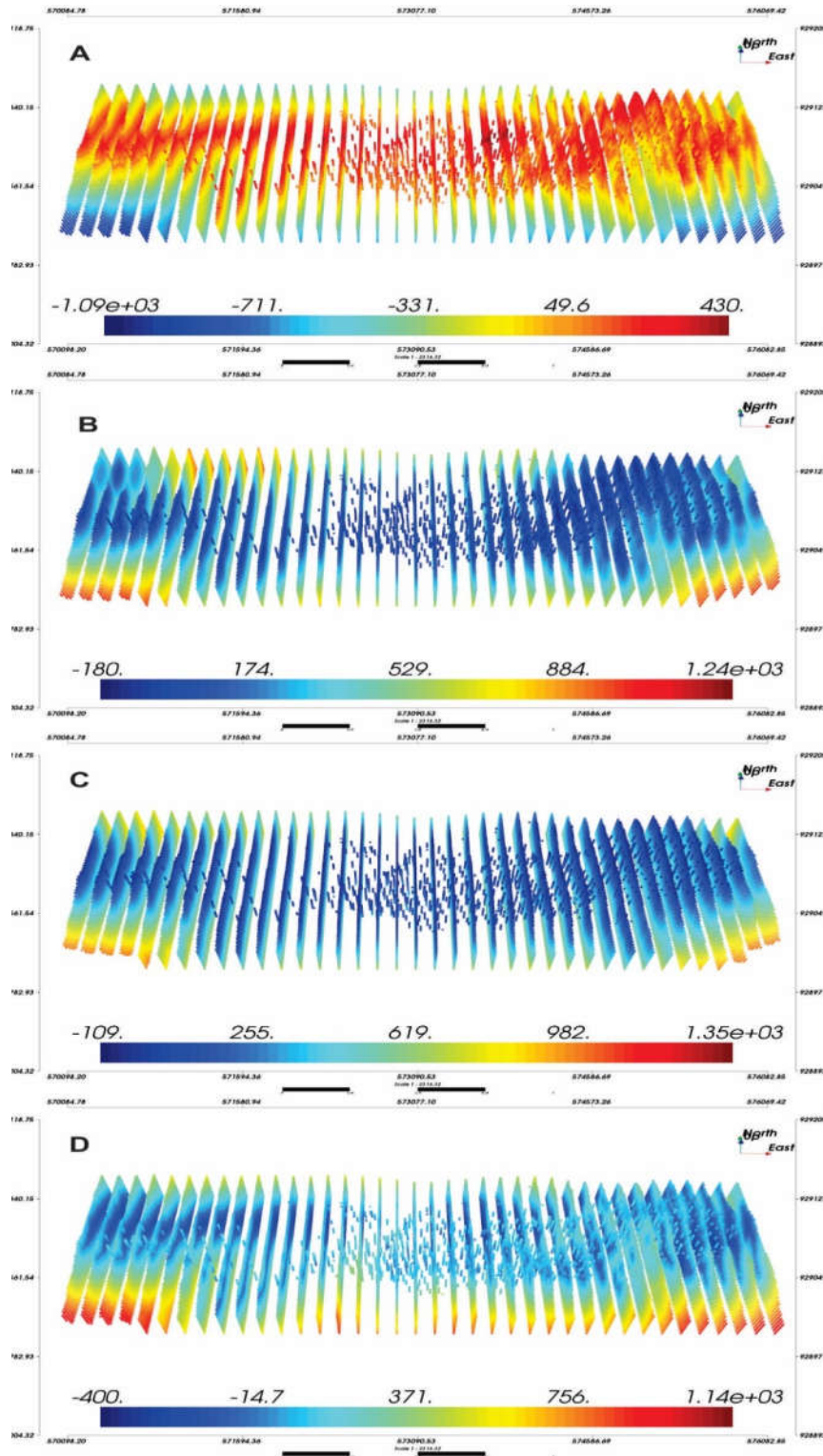


Figura 4-16: A figura apresenta as distâncias assinaladas calculadas para cada litologia. Em A as distâncias assinaladas calculadas para a categoria 0. Em B as distâncias assinaladas calculadas para a categoria 1. Em C as distâncias assinaladas calculadas para a categoria 2. Em D, as distâncias assinaladas calculadas para a categoria 3. A escala de cores de cores está associada a distância de um tipo categórico ao tipo categórico distinto, as cores escuras representam valores baixos os quais pertencem ao domínio de interesse, enquanto as cores vermelhas e quentes representam valores positivos, ou seja, regiões externas ao domínio de interesse.



### *Análise variográfica*

Os variogramas das distâncias assinaladas apresentam como característica a ausência de estacionalidade. Assim, o variograma tende a aumentar exponencialmente com a distância de separação dos pares. Essa característica pode tornar a definição do variograma de funções distância um tanto arbitrária principalmente na definição do seu alcance.

A forma e a extensão dos domínios construídos a partir da função distância são controlados principalmente pelo alcance do variograma e pela anisotropia. Portanto, aumentar o alcance do variograma em uma dada direção, contribui para o aumento das dimensões desse domínio nesta direção e conseqüentemente, o aumento da proporção deste domínio no modelo geológico. Outra característica comum nos variogramas das distâncias assinaladas é a ausência do efeito pepita. O efeito pepita controla o grau de conectividade entre os domínios, e pode ser adicionado arbitrariamente para que os contatos não fiquem artificialmente suavizados.

A Tabela 4-3 apresenta os variogramas direcionais obtidos através da análise da continuidade espacial para cada uma das distâncias assinaladas, sendo adotada a direção de maior continuidade 90°/00°, continuidade intermediária em 00°/00° e menor continuidade em 00°/90°. Na análise, foi utilizado uma separação de *lag* de 50m, número de lags de 80, tolerância angular de 22,5° e largura da banda de 25 metros.

Tabela 4-3: Resumo dos modelos adotados para a variografia das distâncias assinaladas.

	SD-0		SD-1		SD-2		SD-3	
<b>N.E.</b>	581		558		484		511	
<b>GAUSS 1</b>	20000		15000		8000		10000	
<b>GAUSS 2</b>	37603		40325		39955		40665	
<b>90/00</b>	1400	3250	1250	2800	1400	2450	750	3250
<b>00/00</b>	900	1400	850	1600	950	1850	500	1400
<b>00/90</b>	650	1050	550	1050	330	700	450	1300

\*SD-0: função distância para a categoria 0. SD-1: função distância para a categoria 1. SD-2: função distância para a categoria 2. SD-3: função distância para a categoria 3. N.E.: Efeito Pepita. Gauss 1: contribuição da primeira estrutura gaussiana. Gauss 2: contribuição da segunda estrutura gaussiana. 90/00: Alcances na direção de maior continuidade. 00/00: Alcances na direção intermediária. 00/90: alcances na direção de menor continuidade:

### *Interpolação das distâncias assinaladas*

As distâncias assinaladas foram interpoladas por krigagem ordinária para todos os nós do grid, o que resultou em um total de 1417500 blocos estimados. O mesmo grid do modelo de referência foi utilizado para a estimativa das distâncias assinaladas, e as suas propriedades são apresentadas na Tabela 4-1.

Os parâmetros utilizados na estimativa por krigagem ordinária são apresentados na Tabela 4-4. Como discutido anteriormente, a utilização da krigagem

ordinária como alternativa a krigagem global, na interpolação das distâncias assinaladas, necessita de um grande raio de busca com ao menos 4x a malha amostral, e um elevado número de amostras de no mínimo 25 amostras, com o objetivo de evitar a presença de artefatos nos modelos geológicos. Diversos valores de parâmetros foram testados com o objetivo de obter a melhor estimativa possível.

Os quatro domínios modelados a partir da interpolação de funções distância são apresentados na Figura 4-18. Note a presença de alguns blocos isolados e espaços gerados devido a amostras isoladas presentes no banco de dados. O modelo interpolado é apresentado na Figura 4-17, no qual fica evidente que a transição entre categorias ocorre de modo contínuo, e quando comparadas com o modelo de referência, demonstram feições adequadas com modelos geológicos realistas.

Tabela 4-4: Parâmetros da interpolação das distâncias assinaladas.

<b>KRIGAGEM ORDINÁRIA</b>					
<b>Orientação do elipsoide</b>		<b>Alcance (m)</b>		<b>Quantidade de amostras</b>	
Azimute	90º	Máximo	850	Máximo	55
Dip	00º	Médio	500	Mínimo	3
Rake	00º	Mínimo	340		

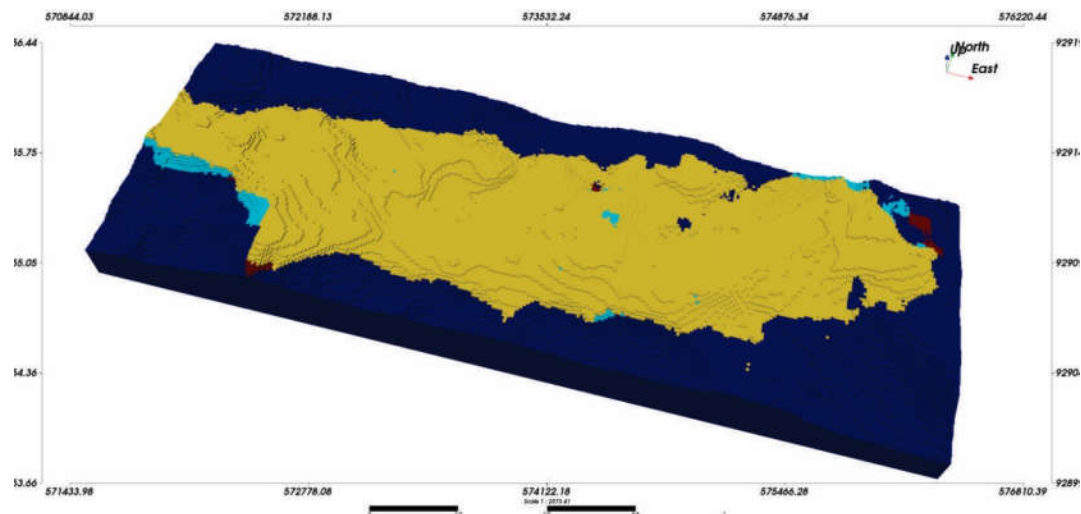


Figura 4-17: Modelo geológico gerado obtido a partir da interpolação das distâncias assinaladas. Note a transição suave e realista entre as litologias. Na imagem, a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estêreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

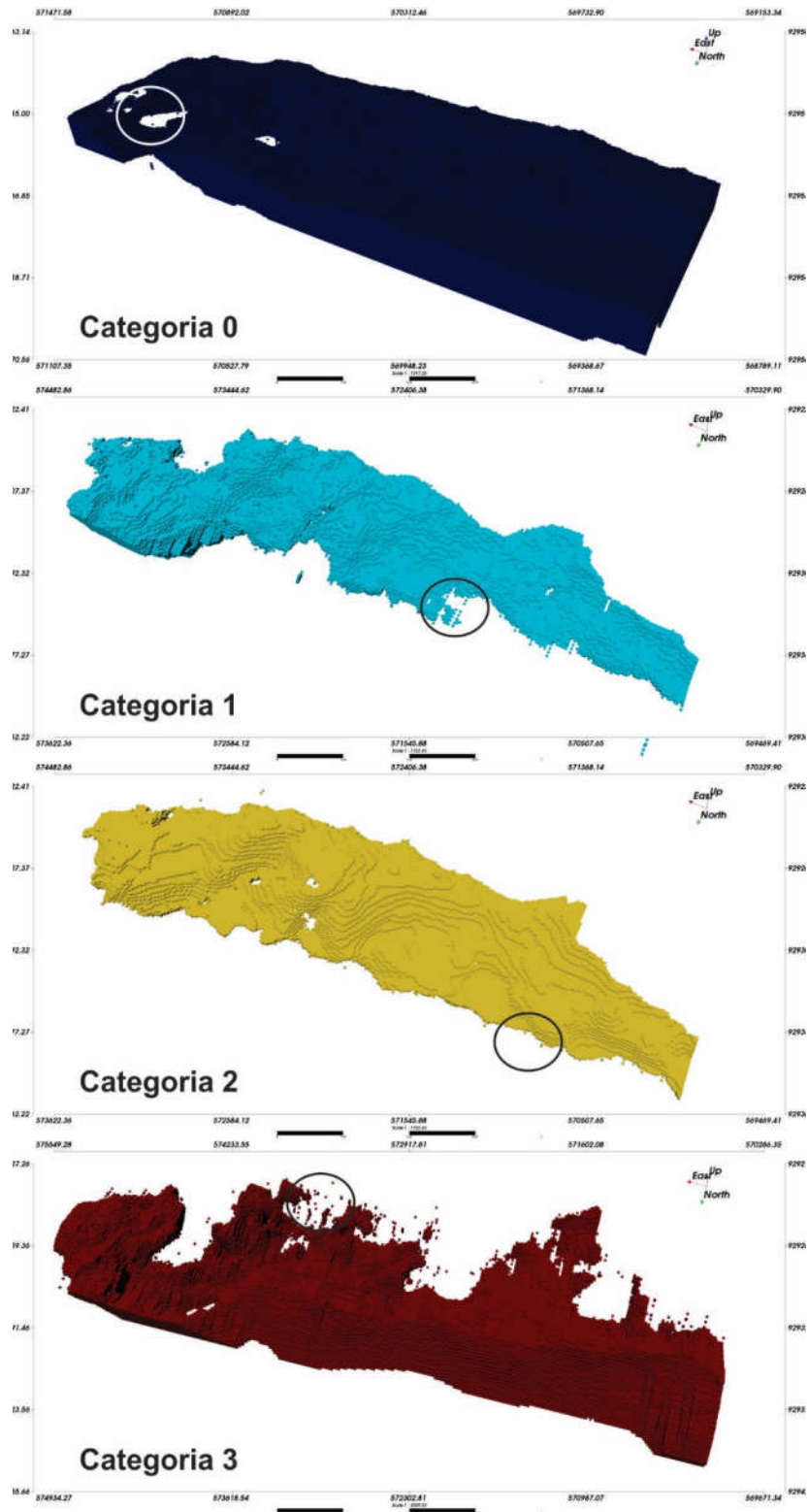


Figura 4-18: A figura exibe o resultado da interpolação de cada categoria. São apresentadas cada categoria separadamente do modelo interpolado. Note nos círculos a presença de blocos isolados e dispersos nas quatro categorias. Nas imagens, a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.



### Zona de incerteza

A zona de incerteza é determinada a partir de um modelo com as menores distâncias estimadas estandardizadas para cada nó do grid. As distâncias entre os dados possibilitam obter informação a respeito da incerteza dos contatos entre domínios geológicos. Portanto, foi construído o modelo *ucof* a partir das menores distâncias estimadas para cada categoria a partir da equação 3-12, que reflete a incerteza quanta a localização do contato geológico a partir das distâncias calculadas. Considerando a equação, os valores das menores distâncias foram estandardizados. Valores próximos a 1 representam uma incerteza menor em relação a localização do contato, e; portanto, resultam em zonas de incerteza menores. A imagem A da Figura 4-19 apresenta o modelo *ucof* para as menores distâncias. Note a região demarcada em vermelho escuro que representa os valores próximos a 1 de grande incerteza, e os valores baixos em azul de menor incerteza.

O gráfico de probabilidade do modelo *ucof* permite identificar a presença de descontinuidades na distribuição do modelo que podem indicar mudanças de tendências. Diversos valores foram testados para a construção da zona de incerteza considerando o gráfico da imagem B presente na Figura 4-19, o que resulta em diferentes tamanhos para a zona de incerteza. O valor de 0,85 foi selecionado para a construção da zona de incerteza por representar a início da mudança de padrão da distribuição do modelo *ucof*, que reflete a incerteza em relação ao contato.

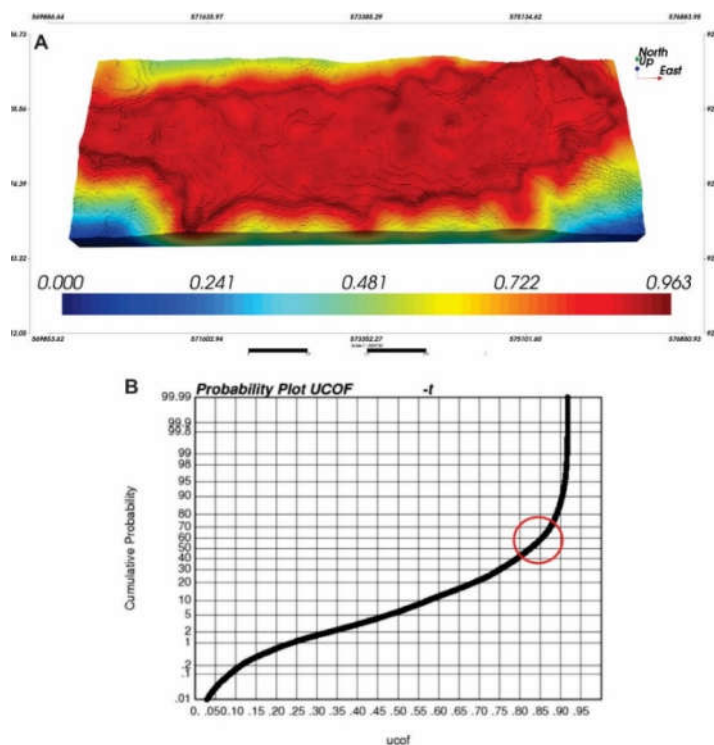


Figura 4-19: A figura apresenta o modelo *ucof* e o gráfico de probabilidade utilizado para construção da zona de incerteza. A imagem A apresenta o modelo *ucof* das menores distâncias, na qual a escala de cores representa a incerteza associada aos contatos entre domínios. Valores elevados na cor vermelha representam grande incerteza e valores baixos na cor azul representam baixa incerteza. A imagem B exibe o gráfico de probabilidade do modelo *ucof*, que demonstra a mudança no padrão selecionada para a seleção do *cutoff*.

A imagem A da Figura 4-20 apresenta a zona de incerteza estabelecida a partir do *cutoff* de 0,85 a partir do modelo *ucof*, nesta região será realizada a simulação da função distância. Na imagem B está representada a seção leste-oeste no corte 140 do modelo *ucof* no qual a região de incerteza ainda não foi retirada do modelo completo. A imagem C exibe a seção leste-oeste corte 140 do modelo *ucof* com valores acima do *cutoff* estabelecido para determinar a zona de incerteza.

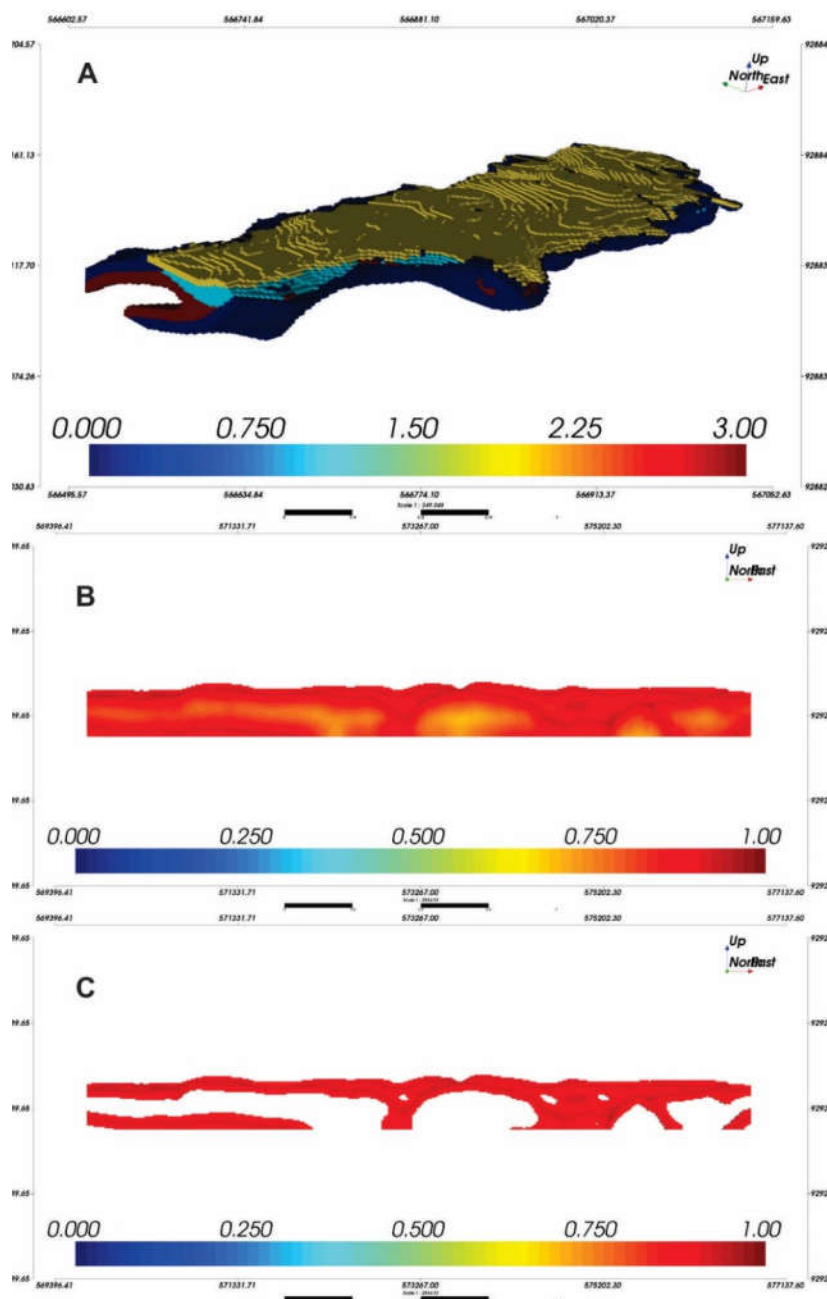


Figura 4-20: A imagem A exibe a zona de incerteza definida a partir do modelo *ucof*, na qual a escala de cores representa a distinção entre categorias. A imagem B exibe a seção leste-oeste no corte 70 do modelo *ucof*, responsável pela incerteza da localização do contato geológico e a imagem C apresenta a seção corte 70 no *cutoff* de 0,85 do modelo *ucof* estabelecida para gerar a zona de incerteza. Nas duas últimas imagens, a escala de cores representa a incerteza relacionada ao contato, de modo que cores azuis representam baixa incerteza e cores avermelhas alta incerteza.

### Simulação das distâncias assinaladas

A simulação das distâncias assinaladas, dentro da zona de incerteza, necessita da redução do grid original. Desta forma, os o tamanho dos blocos foi diminuído pela metade. A Tabela 4-5 apresenta as novas propriedades do grid utilizado na simulação.

Tabela 4-5: Propriedades do grid de simulação.

	Min	Max	Tamanho dos blocos	Número de blocos	Dimensão
X	569.504	577.004	12,5	600	7.500
Y	9.290.879	9.293.504	12,5	210	2.625
Z	221	896	7,5	90	675

Ao determinar a zona de incerteza, ocorre uma diminuição significativa na quantidade de blocos que serão simulados, quando comparados ao total do grid estabelecido. A Tabela 4-6 apresenta a comparação em volume de blocos, em que a região simulada equivale a 35% do total de blocos do grid construído.

Tabela 4-6: Proporção da zona de incerteza e o grid de simulação.

	Número de Blocos	Fração do Volume Total (%)
<b>Zona de incerteza</b>	4021090	35
<b>Complemento</b>	7318910	65
<b>Grid Total</b>	11340000	100

A simulação das distâncias assinaladas foi realizada pelo método das bandas rotativas, e os parâmetros utilizados na simulação são apresentados na Tabela 4-7. Como resultado, foram construídas 20 realizações, sendo que as quatro categorias em conjunto representam o total de 80 realizações. Ao aplicar metodologia das bandas rotativas foi selecionado o valor de 1000 linhas. Os valores simulados pela metodologia representam o centro de cada bloco.

Tabela 4-7: Parâmetros de simulação.

SIMULAÇÃO					
Direção do elipsoide		Alcance de busca (m)		Quantidade de amostras	
Azimute	90º	Máximo	2000	Máximo	55
Dip	00º	Médio	1500	Mínimo	1
Rake	00º	Mínimo	750		

A Figura 4-21 retrata quatro realizações 0, 5 10 e 15 obtidas na simulação das distâncias assinaladas na zona de incerteza. As quatro realizações de cada categoria são apresentadas de modo individual nas figuras 4-22, 4-23, 4-24 e 4-25, referentes aos estéreis, a hematita, a canga superficial e aos jaspelitos, respectivamente. Apesar da pequena diferença entre realizações, a incerteza associada aos contatos fica evidente ao compararmos as regiões demarcadas nas imagens para cada categoria, que exibem as diferentes proporções para cada realização. Como na simulação, é utilizado um grid com blocos pequenos, ao caracterizar a complexidade geológica do depósito pelo método ocorre a textura *salt and pepper* em algumas realizações das categorias. Apesar disso, a presença da textura pode ser desconsiderada já que para caracterizar a incerteza dos contatos interessa a variabilidade volumétrica obtida na simulação. Além disso, é possível observar regiões em que os modelos apresentados estão muito suavizados, ou seja, situações um pouco distantes da realidade geológica.

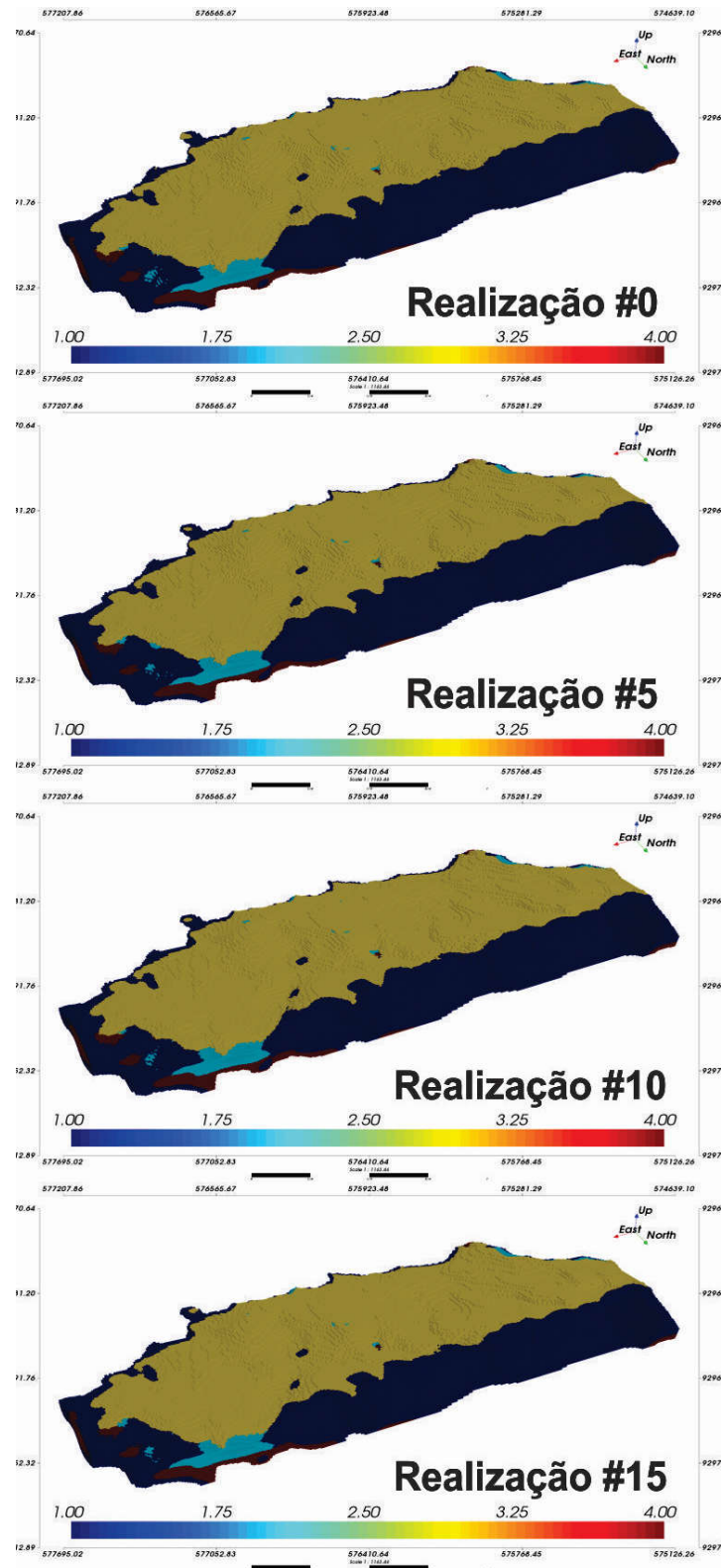


Figura 4-21: A figura exhibe as realizações 0, 5, 10 e 15 da zona de incerteza de 0,85 obtidas na simulação das distâncias assinaladas. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estêreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

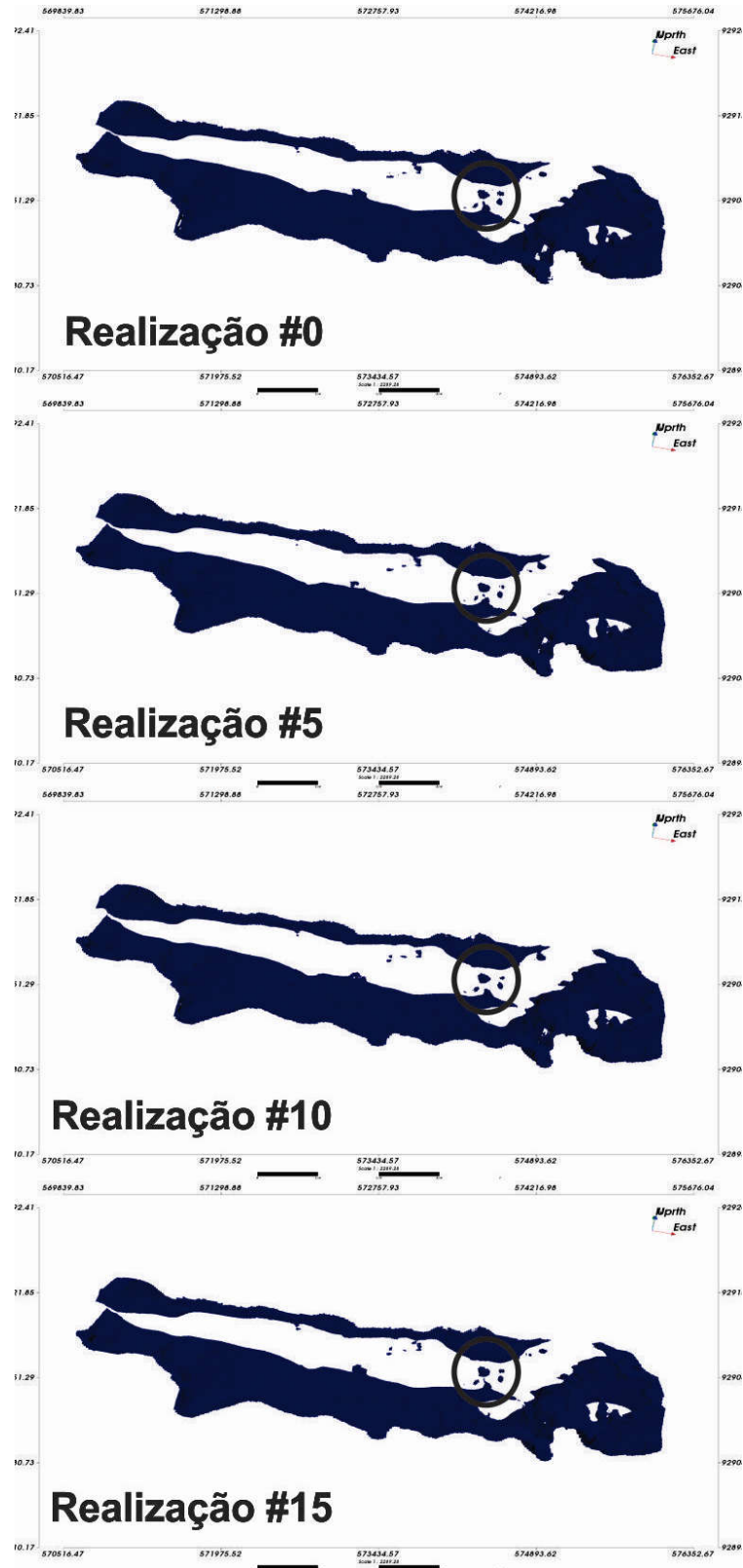


Figura 4-22: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 0 dos estêreis na cor azul. As regiões demarcadas em cada realização demonstram a variabilidade obtida na simulação. Note a presença ou ausência de blocos na região demarcada de acordo com a realização.

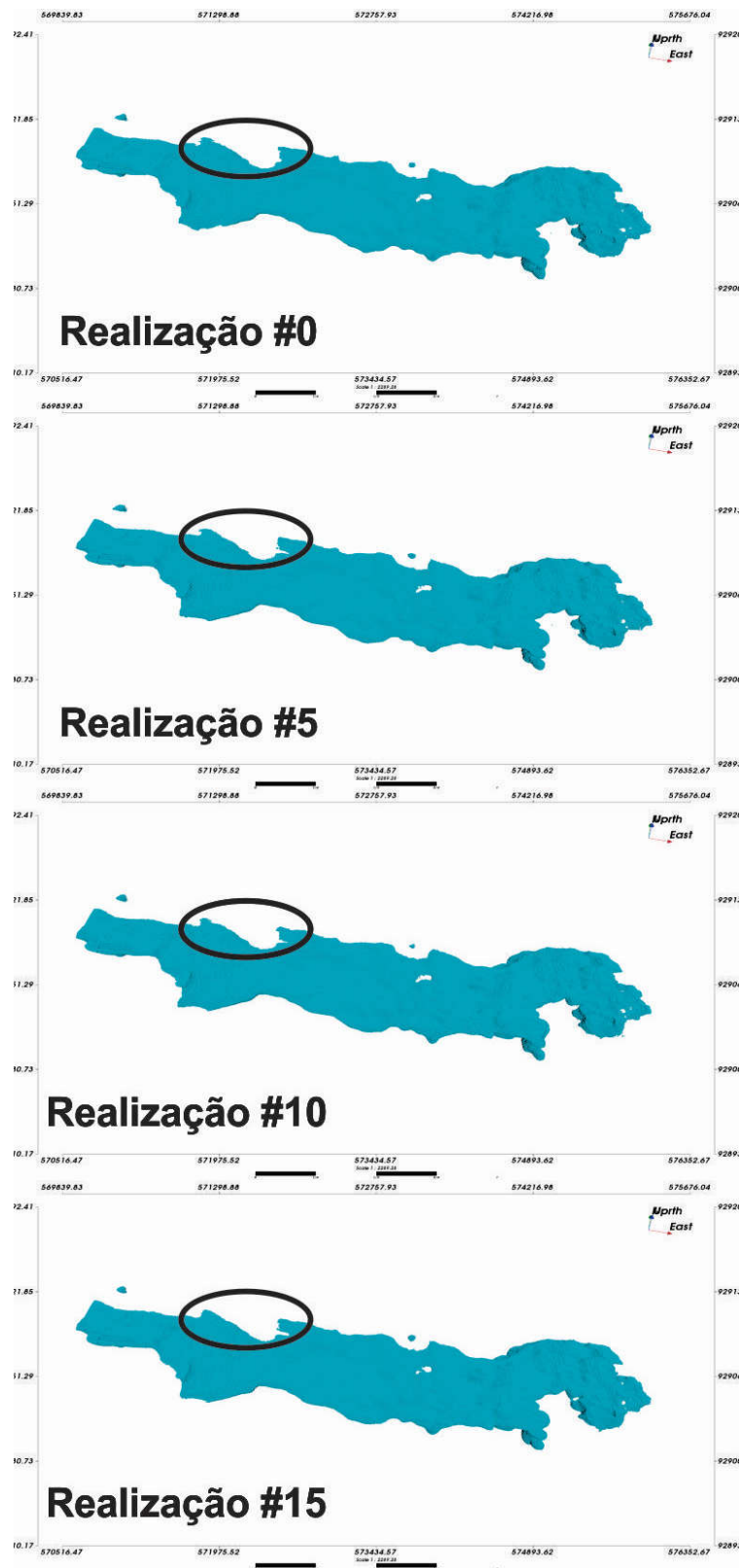


Figura 4-23: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e 15 da categoria 1 da hematita na cor azul claro. As regiões demarcadas em cada realização demonstram a variabilidade obtida na simulação. Note a presença ou ausência de blocos na região demarcada de acordo com a realização.

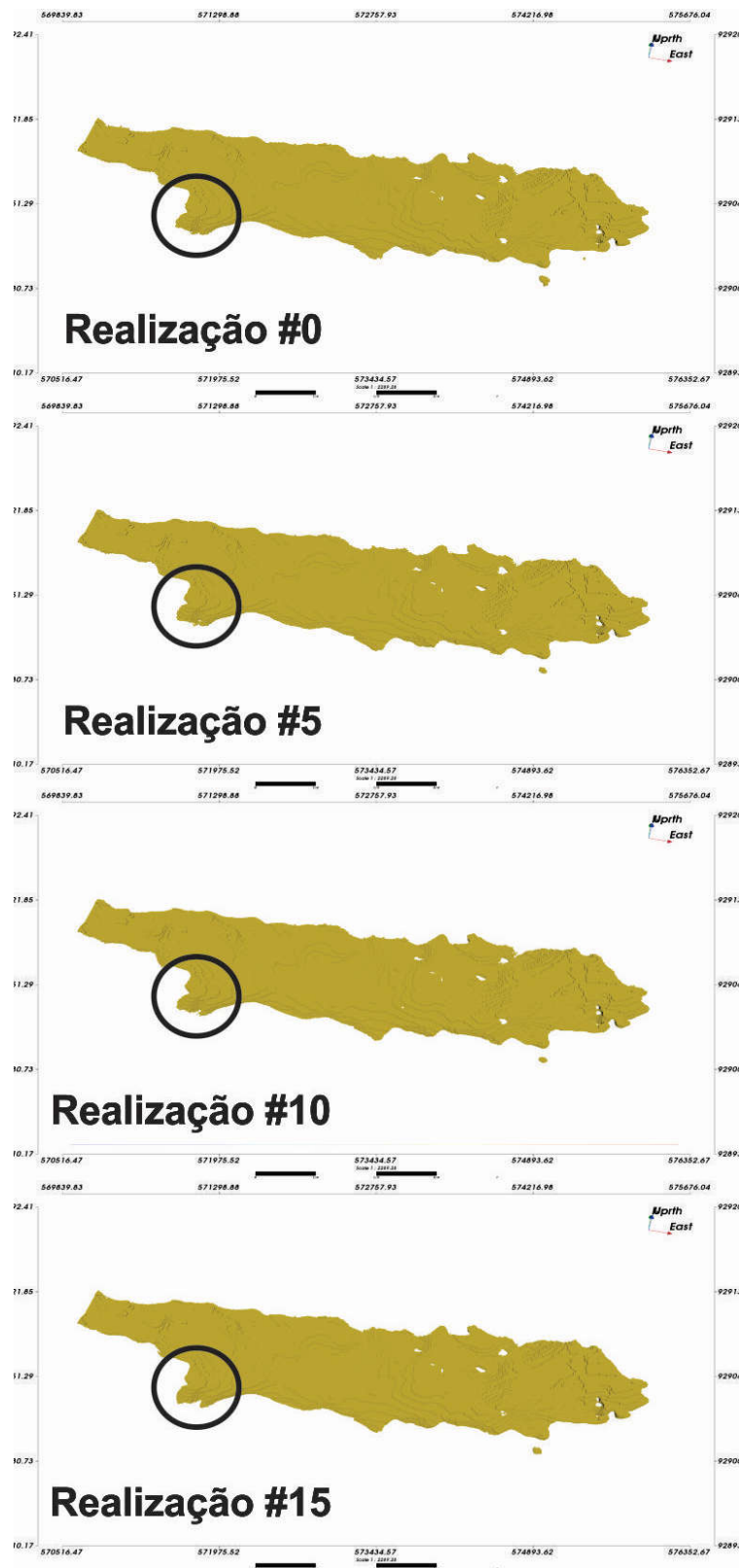


Figura 4-24: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 2 da canga superficial na cor amarela. As regiões demarcadas em cada realização demonstram a variabilidade obtida na simulação, note a diferença da quantidade de blocos e o tamanho do domínio.



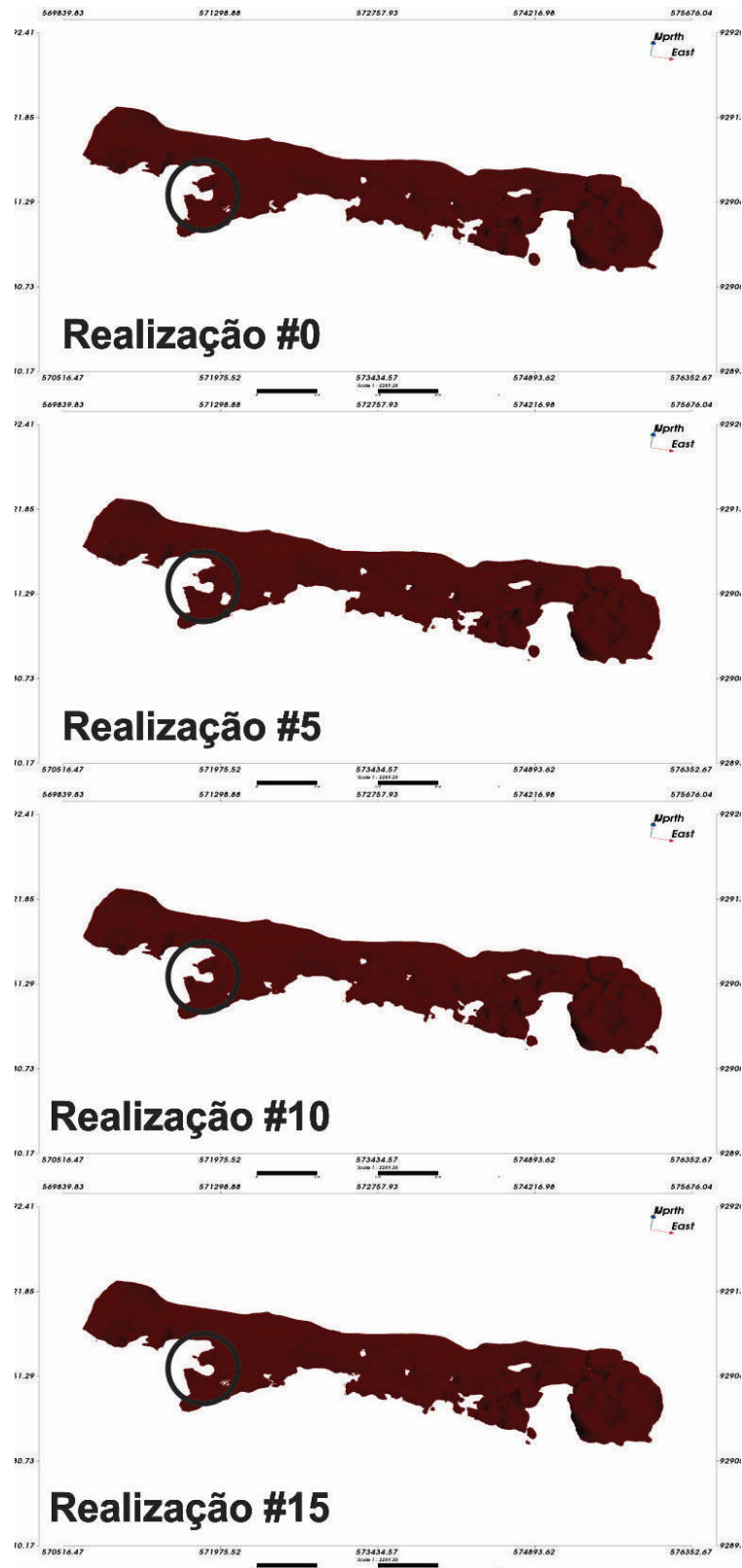


Figura 4-25: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e15 da categoria 3 dos jaspelitos na cor vermelha. As regiões demarcadas em cada realização demonstram a variabilidade obtida na simulação. Note a presença ou ausência de blocos na região demarcada de acordo com a realização.

### *Pós-processamento e validação das realizações*

As vinte realizações obtidas na simulação foram validadas através da comparação entre a distribuição das proporções das categorias e as proporções das categorias do modelo de referência. A Figura 4-26 abaixo apresenta as proporções obtidas nas realizações, que apresentam flutuações muito pequenas entre as proporções de cada realização. Ao compararmos todas as realizações, as categorias 0 e 3 referentes aos estéreis e ao jaspelito são subvalorizadas em média 1% e 3%, enquanto a hematita é supervalorizada em 16% em média.

Os resultados obtidos na simulação foram satisfatórios, apresentando feições litológicas condizentes com a litologia representada por cada categoria. As realizações obtidas na simulação das distâncias assinaladas foram comparadas com as amostras e seções utilizadas como banco de dados para confirmar se as realizações honram os dados em cada local. Na Figura 4-27, é apresentada a realização 5 que comprova que os dados foram respeitados, a partir das três seções leste-oeste e duas seções norte-sul. Note que nas seções 60, 120 e 180 em Y os locais marcados pelos círculos 1 e 2 tornam evidente que os dados foram honrados durante a simulação. Note em 3 a que os dados de seções geológicas adicionados aos bancos de dados para a construção do modelo foram respeitados na realização apresentada. Considerando as seções 100 e 300 em X os locais marcados em 4 e 5 confirmam que os dados dos furos de sondagem são concordantes com as realizações.

Os variogramas das realizações foram comparados contra os variogramas das distâncias assinaladas de cada categoria do banco de dados. A validação dos variogramas foi realizada para as três direções principais:  $90^{\circ}/00^{\circ}$ ,  $00^{\circ}/00^{\circ}$  e  $00^{\circ}/90^{\circ}$ . As figuras 4-28, 4-29, 4-30 e 4-31 apresentam a validação dos variogramas, em verde são representadas as realizações obtidas na simulação e em vermelho o variograma das distâncias assinaladas. Como discutido anteriormente, o variograma das distâncias assinaladas apresenta comportamento não estacionário, portanto, o objetivo da validação foi verificar se a continuidade espacial é reproduzida nas realizações a pequena e a médias distâncias. Os resultados apresentados na imagem validam as realizações obtidas.

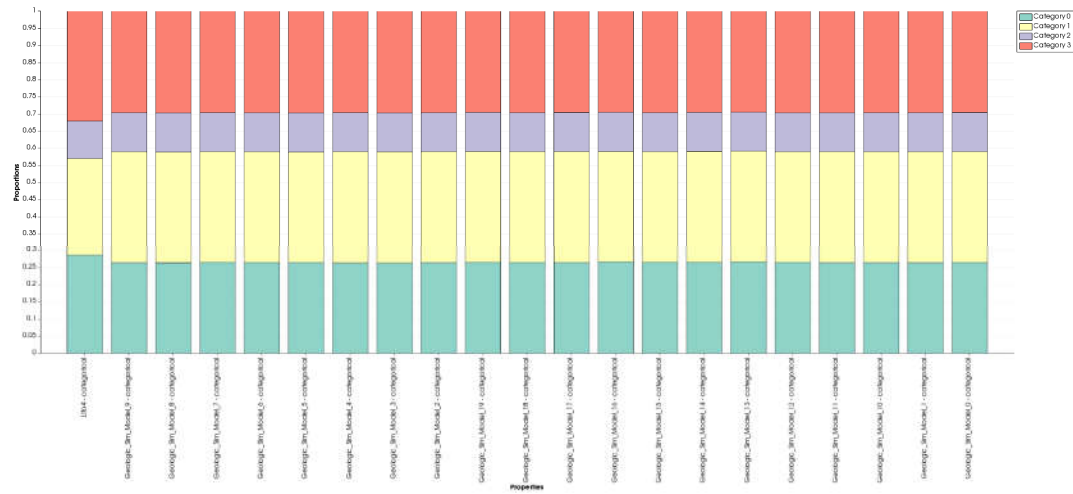


Figura 4-26: A imagem apresenta a proporção das 20 realizações obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência Lito4. Na imagem, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estereois, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

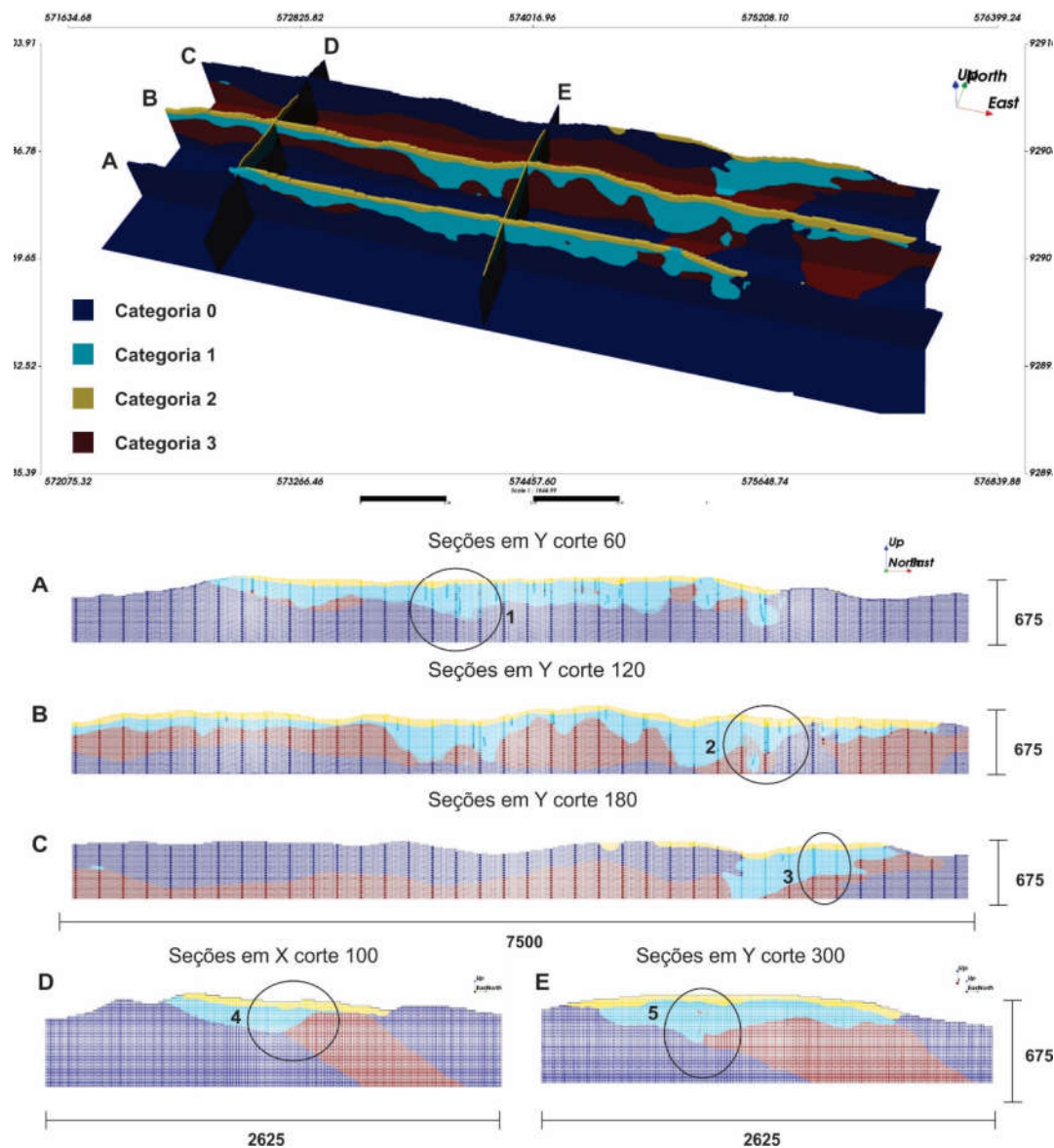


Figura 4-27: A imagem apresenta as seções verticais da realização 5 evidenciando que os dados foram honrados na simulação das distâncias assinaladas. Seções leste-oeste nos cortes 60, 120 e 180 do modelo de blocos de A a C, e seções norte-sul nos cortes 100 e 300 do modelo de blocos em D e E. Note nas regiões demarcadas 1 e 2, que os dados provenientes de furos de sondagem foram honrados durante a simulação. A região demarcada 3 demonstra que os dados provenientes de seções geológicas acrescentadas ao banco de dados foram respeitados. Note, que na região 4, os centroides de cada bloco coincidem com os dados provenientes de seções geológicas, e na região 5 a presença do furo de sondagem em que os dados foram honrados na realização apresentada. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

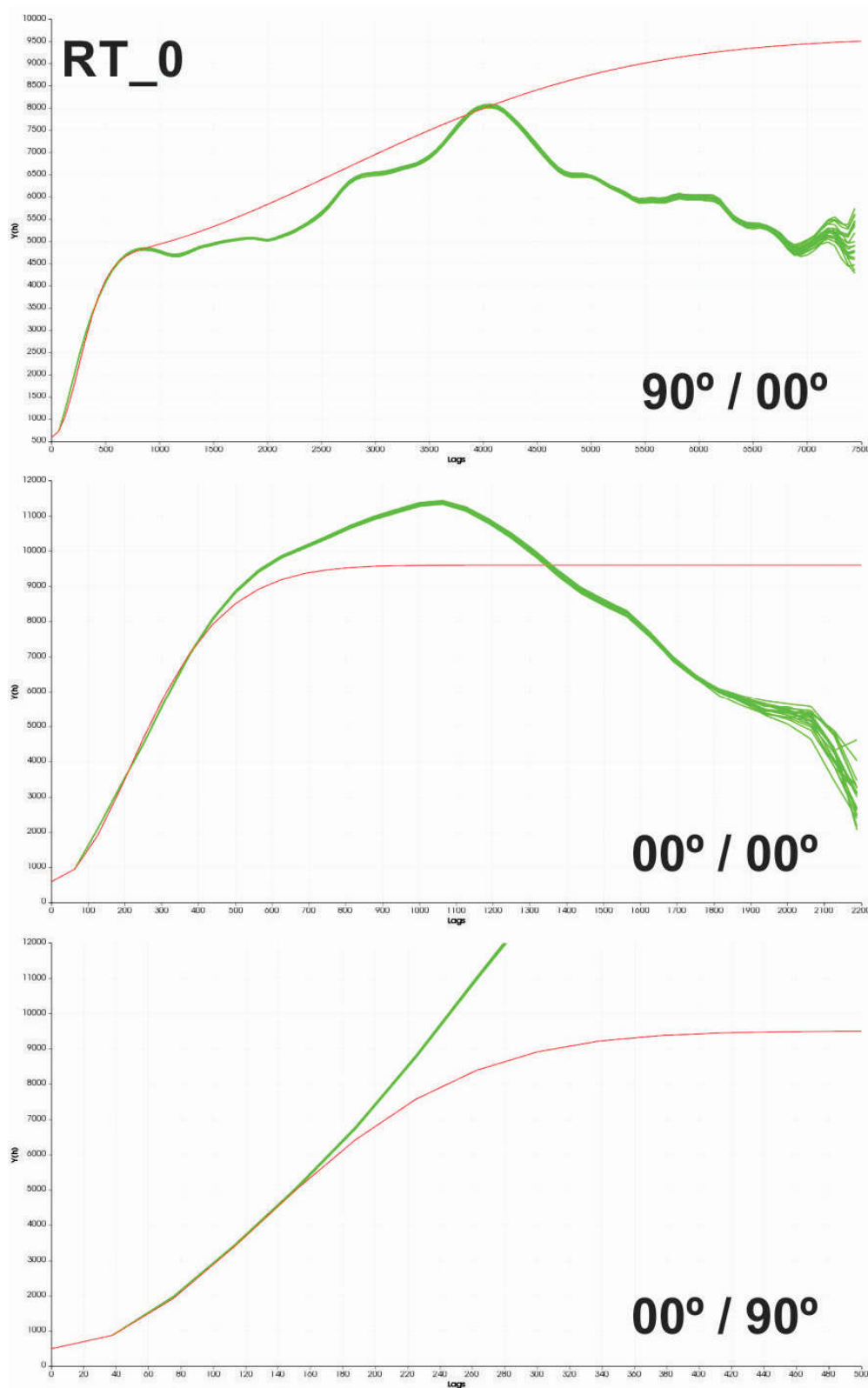


Figura 4-28: A figura exibe a validação dos variogramas nas três direções principais da função distâncias  $RT_0$ . A cor verde representa as realizações obtidas na simulação e a cor vermelha o variograma das distâncias assinaladas. Note que o objetivo da validação foi verificar se a continuidade espacial é reproduzida nas realizações a pequenas e a médias distâncias

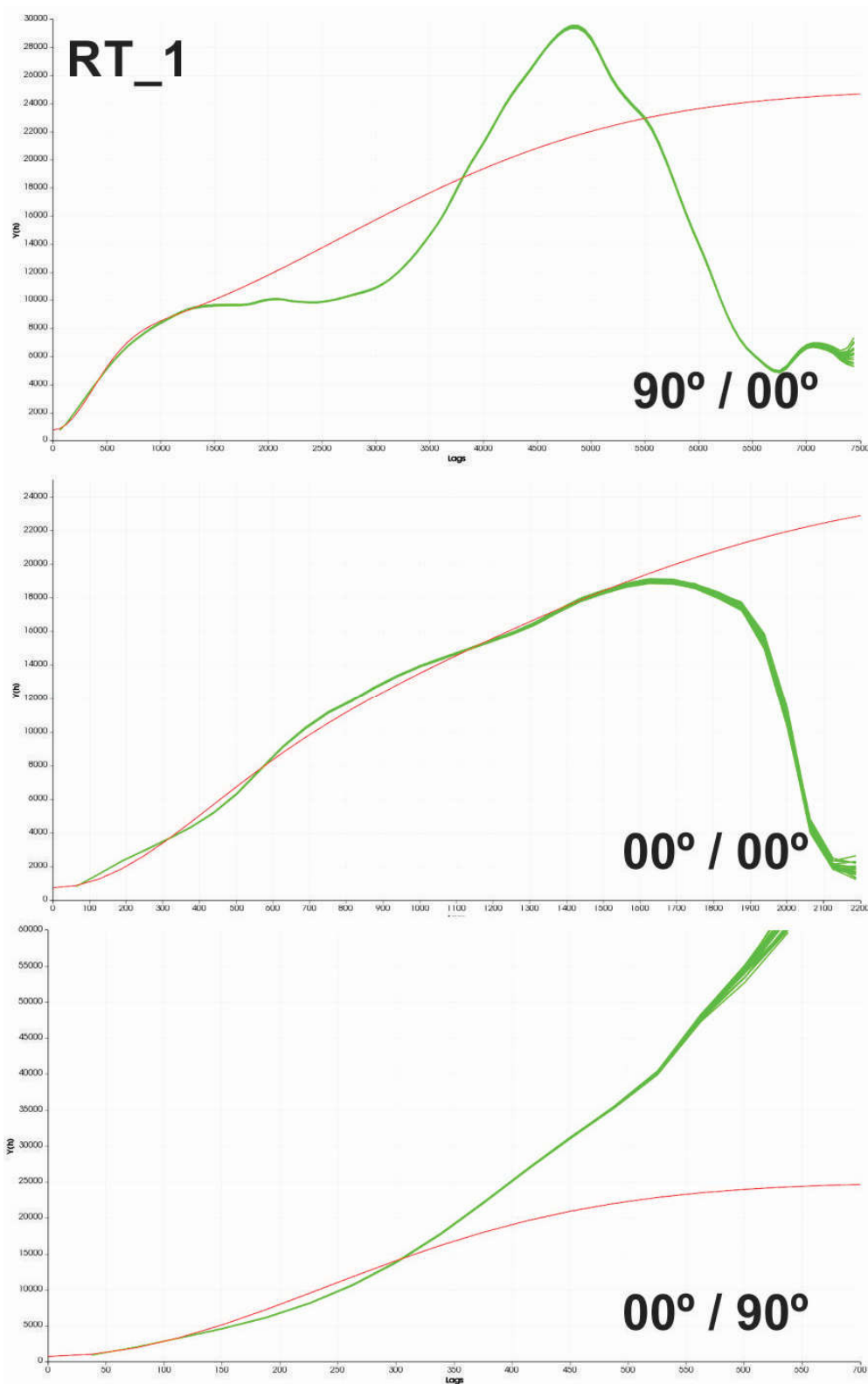


Figura 4-29: A figura exibe a validação dos variograma nas três direções principais da função distâncias  $RT_1$ . A cor verde representa as realizações obtidas na simulação e a cor vermelha o variograma das distâncias assinaladas. Note que o objetivo da validação foi verificar se a continuidade espacial é reproduzida nas realizações a pequenas e a médias distâncias

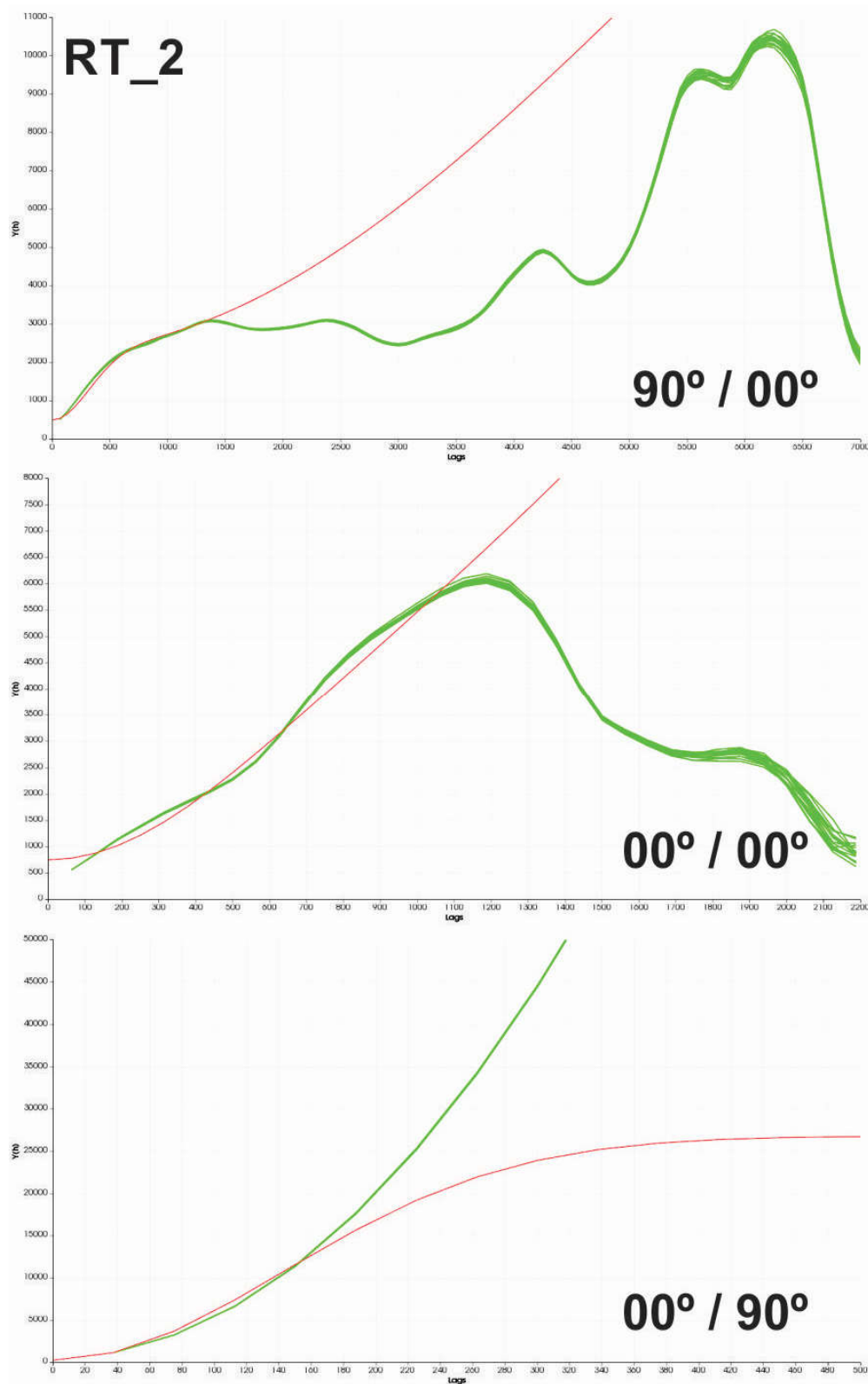


Figura 4-30: A figura exibe a validação dos variograma nas três direções principais da função distâncias RT\_2. A cor verde representa as realizações obtidas na simulação e a cor vermelha o variograma das distâncias assinaladas. Note que o objetivo da validação foi verificar se a continuidade espacial é reproduzida nas realizações a pequenas e a médias distâncias.

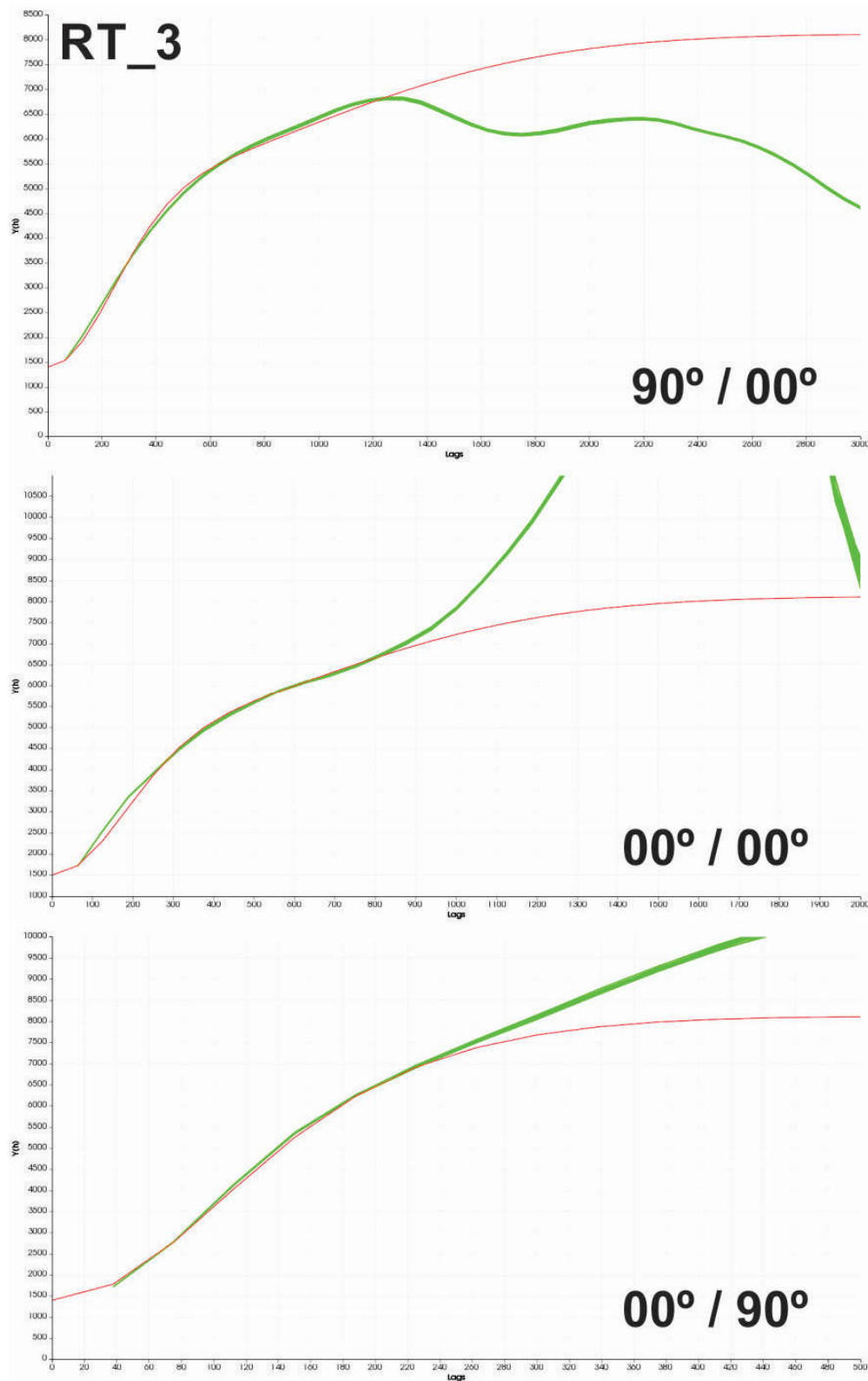


Figura 4-31: A figura exibe a validação dos variogramas nas três direções principais da função distâncias  $RT_3$ . A cor verde representa as realizações obtidas na simulação e a cor vermelha o variograma das distâncias assinaladas. Note que o objetivo da validação foi verificar se a continuidade espacial é reproduzida nas realizações a pequenas e a médias distâncias.



#### 4.3.2. Parâmetro C para múltiplas realizações (SD-C)

O banco de dados de ferro foi utilizado para o estudo de caso do método do parâmetro C apresentado anteriormente no Capítulo 3. Esse banco de dados é composto de diversas litologias, agrupadas em quatro categorias de interesse no total de 51160 amostras categóricas, obtidas a partir de dados de furos de sondagem e dados provenientes de seções geológicas interpretadas.

A metodologia usa o input de forma binária e apenas um domínio deve ser avaliado por vez. Por esse motivo, são considerados os diversos domínios sucessivamente, de forma hierárquica. Para aplicar a abordagem hierárquica, as categorias foram divididas em conjuntos, de modo a representar os controles estruturais dos litotipos representados por cada categoria, já que eles afetam diretamente o formato e os limites dos domínios geológicos no depósito. A abordagem hierárquica normalmente é utilizada de modo cronológico, ou seja, os domínios são construídos do mais antigo para o mais recente, entretanto na construção da hierarquia utilizada foi estabelecido o critério da quantidade de informação e padrões estruturais. Como resultado, tem-se três novos conjuntos ou grupos de dados codificados em indicadores seguindo a hierarquia apresentada no canto esquerdo superior da Figura 4-32. Cada conjunto possui número de amostras distinto, de modo que o primeiro banco de dados contempla todas as amostras. Os demais bancos de dados são subconjuntos do primeiro, contendo apenas as amostras necessárias para determinar os contatos entre as categorias desejadas. As distâncias assinaladas foram calculadas para cada um dos grupos.

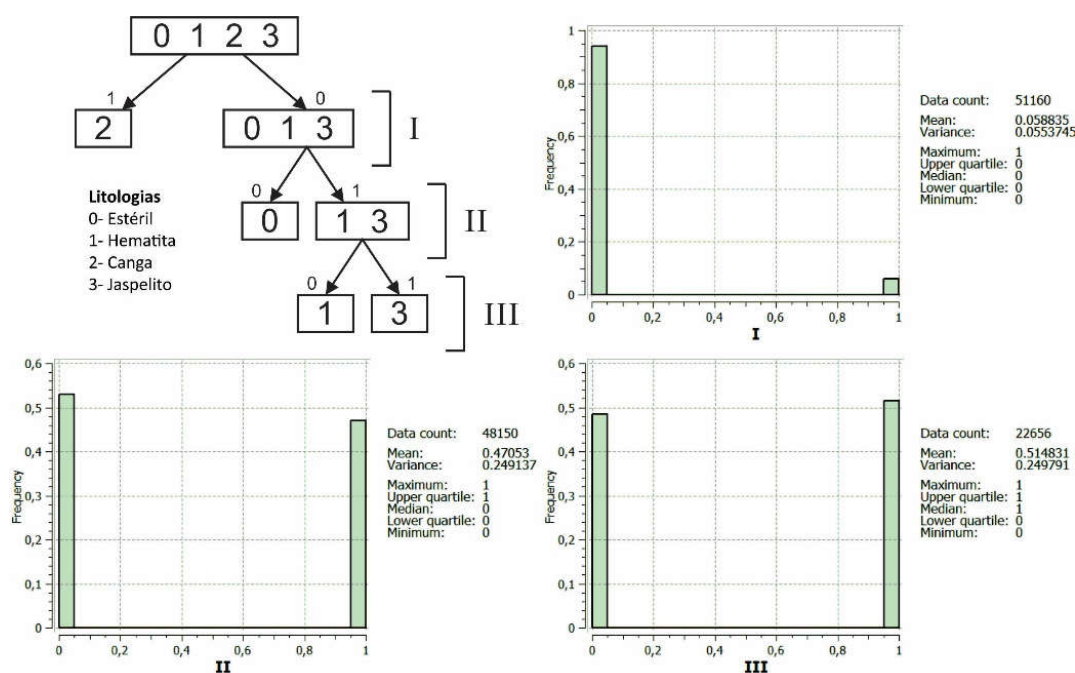


Figura 4-32: A imagem do canto esquerdo superior apresenta a divisão hierárquica do banco de dados S11D utilizada na construção das realizações pelo o modelo SD-C. As demais imagens apresentam os conjuntos de dados construídos a partir da abordagem hierárquica. A imagem do canto direito superior apresenta o histograma do grupo I, a imagem do canto direito inferior o histograma do grupo II e a imagem do canto esquerdo inferior o histograma do grupo III.

### *Distâncias assinaladas e o parâmetro da incerteza C*

Com o objetivo de determinar a incerteza associada aos contatos geológicos, foi estabelecido o valor 150 para o parâmetro C, a partir da malha amostral. As funções distância obtidas para cada novo banco de dados foram calibradas com o mesmo parâmetro C, adicionado às funções distância para regiões externas ao domínio e subtraído em regiões pertencentes ao domínio.

A Figura 4-33 apresentada abaixo exhibe as distâncias assinaladas calculadas para cada grupo, portanto os valores da legenda representam essa variação considerando valores negativos como pertencentes ao domínios de interesse e valores positivos como externos ao domínio. Por consequência, os valores muito negativos de coloração azul representam regiões dentro do domínio e cores avermelhadas quentes representam amostras fora do domínio de interesse. A transição entre as cores escuras azuladas para cores avermelhadas representa a distância calculada e a proximidade entre um tipo indicador e o tipo indicador distinto.

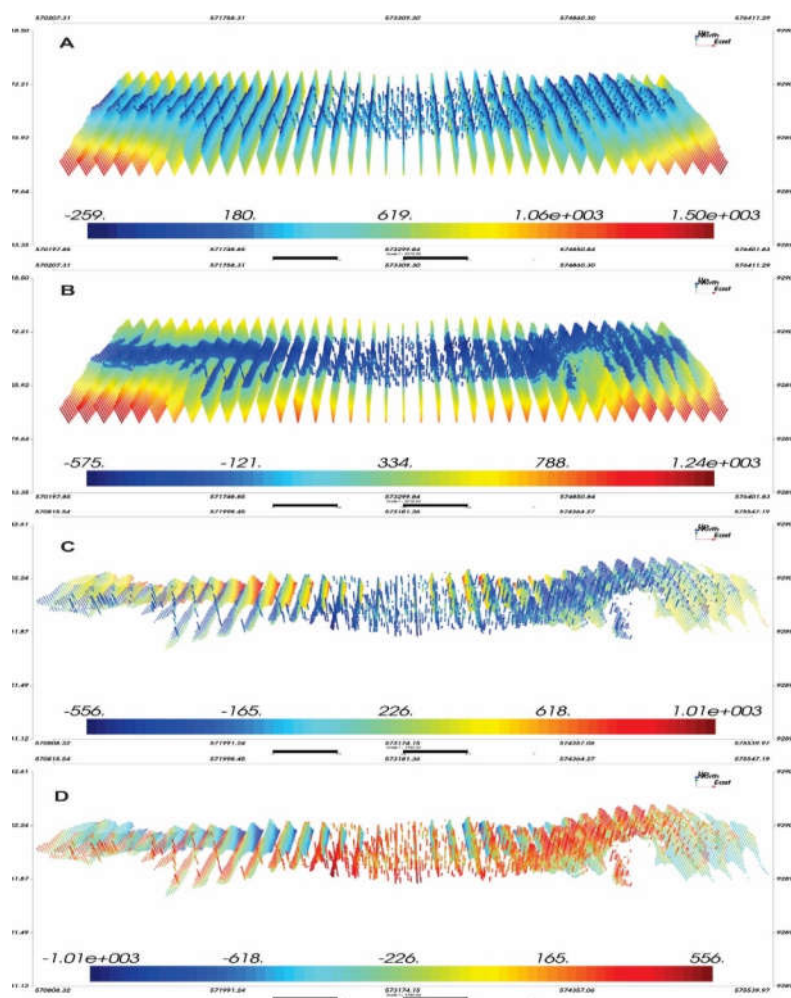


Figura 4-33: A figura exhibe as distâncias assinaladas calculadas para cada categoria e modificadas pelo parâmetro C. Em A, as distâncias assinaladas para o grupo I. Em B, as distâncias assinaladas

para o grupo II. Em C e D, as distâncias assinaladas para o grupo III. A escala de cores de cores está associada a distância de um tipo categórico ao tipo categórico distinto, as cores escuras representam valores baixos os quais pertencem ao domínio de interesse enquanto as cores vermelhas e quentes representam valores positivos, ou seja, regiões externas ao domínio de interesse.

### *Análise variográfica*

O estudo da continuidade espacial das funções distância modificadas pelo parâmetro C foram realizados individualmente para cada conjunto de dados. Cada grupo de dados possui variogramas distintos com o objetivo de representar de maneira realista a continuidade espacial dos domínios representados por cada grupo. A Tabela 4-8 sumariza os variogramas direcionais obtidos, sendo adotada a direção de maior continuidade 90°/00°, continuidade intermediária em 00°/00° e menor continuidade de 00°/90°. O modelo gaussiano foi adotado para a construção dos variograma com o objetivo de representa a grande continuidade espacial da função distância. Na análise, foi utilizado uma separação de *lag* de 50 m, número de lags de 100, tolerância de 22,5° e largura da banda de 25 metros.

Tabela 4-8: Resumo da continuidade espacial dos conjuntos de dados.

	Grupo I		Grupo II		Grupo III	
<b>N.E.</b>	1000		10000		1000	
<b>GAUSS 1</b>	40000		50000		40000	
<b>GAUSS 2</b>	72525		42209		69431	
<b>90/00</b>	960	1080	990	1665	1140	1615
<b>00/00</b>	1520	2960	1050	3650	1850	2800
<b>00/90</b>	520	700	400	500	608	1088

\* N.E.: Efeito Pepita. Gauss 1: contribuição da primeira estrutura gaussiana. Gauss 2: contribuição da segunda estrutura gaussiana. 90/00: Alcances na direção de maior continuidade. 00/00: Alcances na direção intermediária. 00/90: Alcances na direção de menor continuidade.

### *Interpolação das distâncias*

As distâncias assinaladas obtidas anteriormente foram interpoladas por krigagem ordinária para todos os nós do grid, o que resultou em um total de 1.624.180 blocos estimados. O mesmo grid do modelo de referência foi utilizado na interpolação das distâncias assinaladas, suas propriedades são apresentadas na Tabela 4-1. Desta forma, foi necessário interpolar cada novo conjunto de dados, reter o menor valor obtido para a distância e atribuir este valor da classe associada ao menor valor para cada nó do grid. Os conjuntos de dados construídos na hierarquização exigem a utilização de parâmetros de busca diferentes, já que representam o contato entre litologias distintas. Os parâmetros utilizados na krigagem de cada conjunto de dados são apresentados na Tabela 4-9. O grupo I, por exemplo, possui grande continuidade espacial na direção leste-oeste, já que representa a grande continuidade da canga superficial. A Figura 4-35 apresenta os resultados obtidos na krigagem ordinária das distâncias para cada grupo de dados. As distribuições obtidas na interpolação de cada grupo são apresentadas na Figura 4-34, utilizadas posteriormente na construção da zona de incerteza.

Tabela 4-9: Parâmetros de busca usados na krigagem das distâncias.

KRIGAGEM ORDINÁRIA					
Direção do elipsoide		Alcance (m)		Quantidade de amostras	
<b>Grupo I</b>					
Azimute	90º	Máximo	1500	Máximo	45
Mergulho	00º	Médio	1000	Mínimo	3
Inclinação	00º	Mínimo	200		
<b>Grupo II</b>					
Azimute	90º	Máximo	2000	Máximo	45
Mergulho	00º	Médio	1500	Mínimo	3
Inclinação	00º	Mínimo	500		
<b>Grupo III</b>					
Azimute	90º	Máximo	2000	Máximo	45
Mergulho	00º	Médio	1500	Mínimo	3
Inclinação	00º	Mínimo	1000		

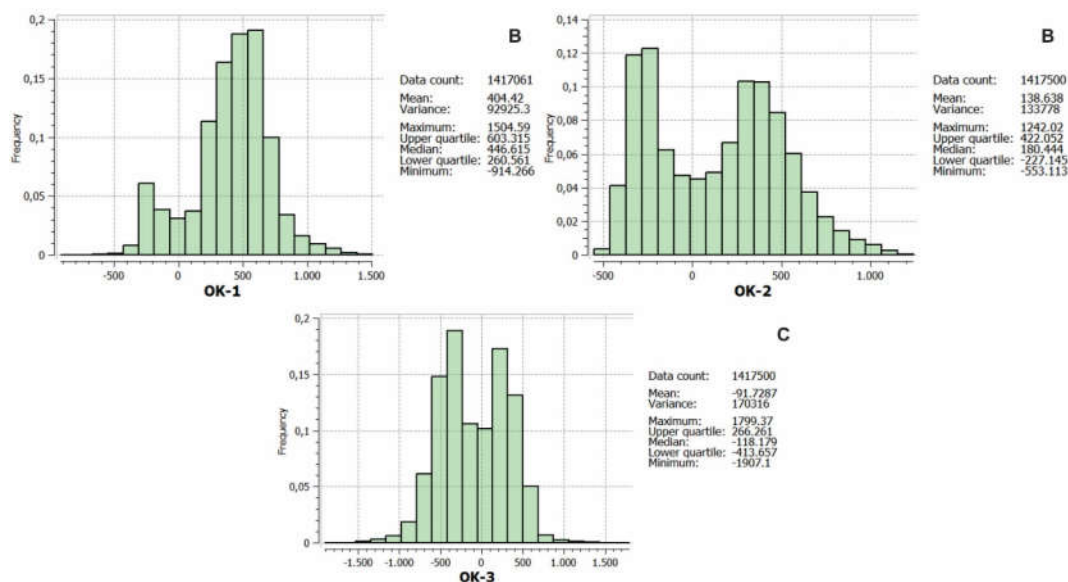


Figura 4-34: A figura apresenta os histogramas dos valores interpolados das funções distância. A imagem A refere ao histograma da interpolação do grupo I. A imagem B refere ao histograma da interpolação do grupo II. A imagem C refere ao histograma da interpolação do grupo III.

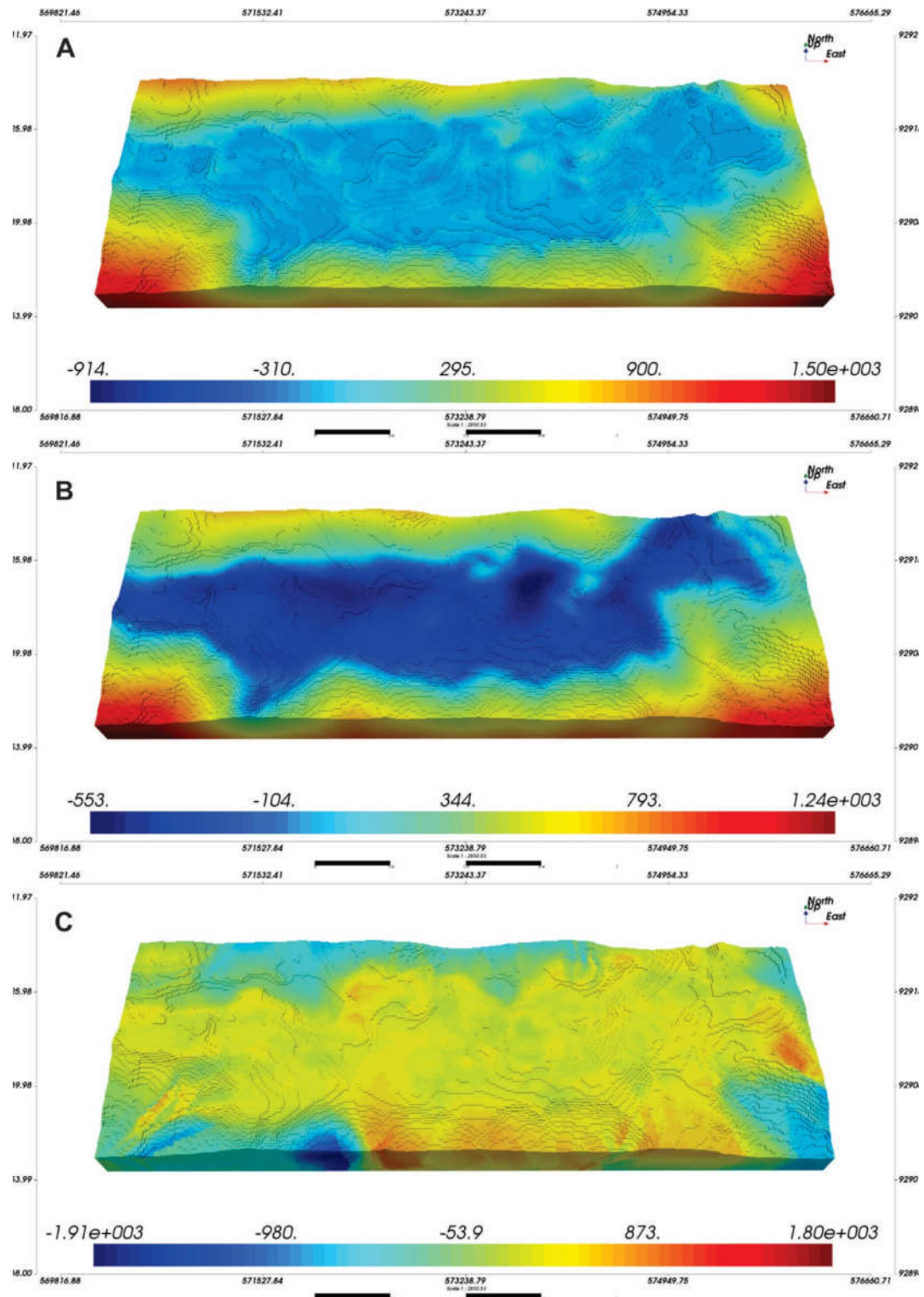


Figura 4-35: A figura exhibe os resultados da krigagem ordinária das funções distâncias para cada grupo. A imagem A refere a interpolação do grupo I. A imagem B refere a interpolação do grupo II. A imagem C refere a interpolação do grupo III. A escala de cores está associada aos valores da função distância modificada interpolados para cada local do grid, valores negativos menores que  $-C$  pertencem ao domínio e valores positivos maiores que  $+C$  externos ao domínio. A região que reúne os valores entre  $-C$  e  $+C$  será determinada como zona de incerteza.



### Zona de incerteza C

A região de incerteza dos contatos entre domínios é obtida a partir do resultado da krigagem ordinária das distâncias modificadas. São selecionados os valores entre  $-C$  e  $+C$  como limites, e a região entre eles determina a zona de incerteza. As diversas realizações para os contatos entre os domínios geológicos são construídas através da simulação não-condicional de valores normais estandardizados nesta região. A Figura 4-36 apresenta as zonas de incerteza estabelecidas para cada uma das três interpolações dos grupos de dados. Para a construção da zona de incerteza, foi adotado o valor de 150 para o parâmetro  $C$ . Na imagem A, está representada a zona de incerteza do grupo I, na imagem B a zona de incerteza do grupo II e a imagem C a zona de incerteza do grupo III.

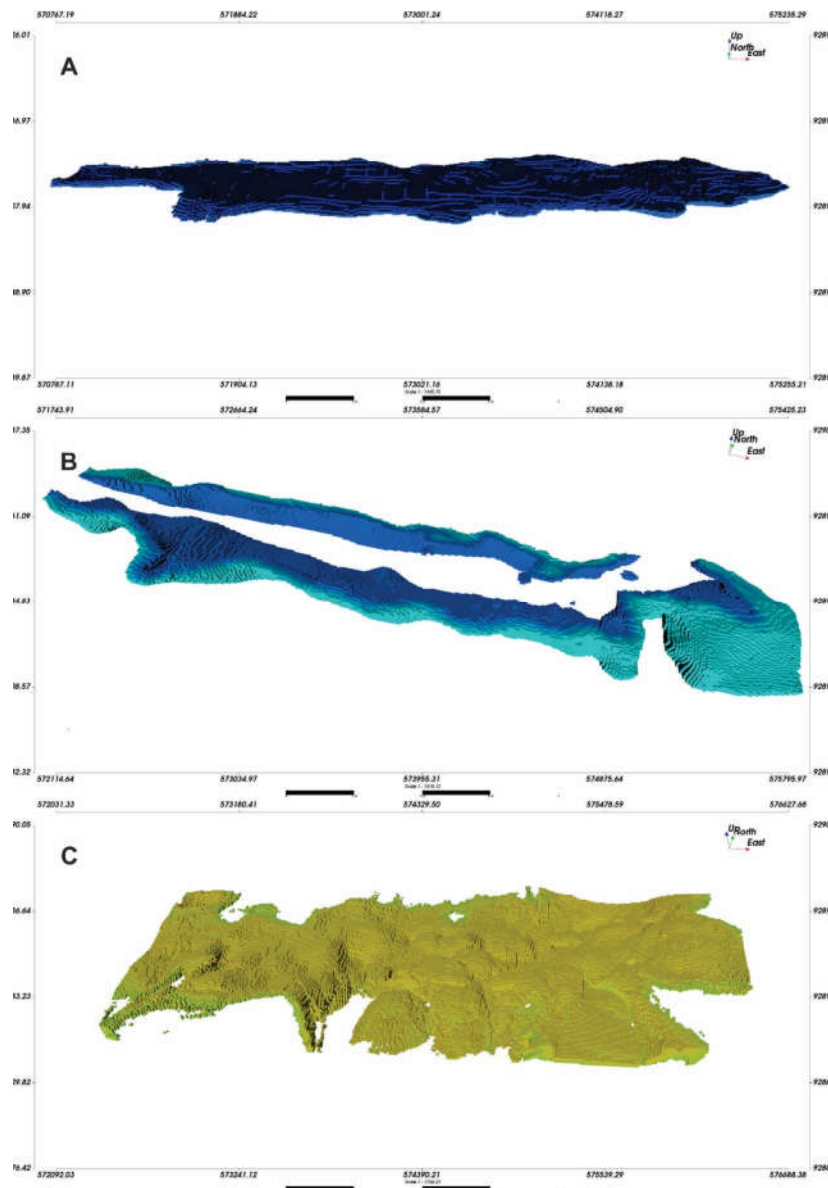


Figura 4-36: A figura apresenta as zonas de incertezas obtidas para cada conjunto de dados. Zona de incerteza para o grupo I em A. Zona de incerteza para o grupo II em B. Zona de incerteza para o grupo III em C. As cores de cada imagem estão associadas aos valores entre  $-C$  e  $+C$  que determinam a zona de incerteza.

### Simulação dos contatos

A simulação não condicional na zona de incerteza foi realizada em um grid com espaçamento entre nós reduzido pela metade em relação ao grid da estimativa (Tabela 4-5). O método de simulação adotado foi o sequencial gaussiano, os parâmetros estabelecidos para a simulação são apresentados na Tabela 4-10. Foram geradas 20 realizações na simulação de cada zona de incerteza, no total de 60 realizações. Na Figura 4-38, são apresentados uma realização para cada zona simulada.

Tabela 4-10: Parâmetros de continuidade espacial utilizados na simulação não-condicional.

Simulação			
Direção do elipsoide	Alcance (m)		
<b>Grupo I</b>			
Azimute	90º	Máximo	1500
Mergulho	00º	Médio	1000
Inclinação	00º	Mínimo	200
<b>Grupo II</b>			
Azimute	90º	Máximo	2000
Mergulho	00º	Médio	1500
Inclinação	00º	Mínimo	500
<b>Grupo II</b>			
Azimute	90º	Máximo	2000
Mergulho	00º	Médio	1500
Inclinação	00º	Mínimo	1000

As múltiplas realizações dos contatos são obtidas ao se classificar os valores dos nós do grid dentro da zona de incerteza. Quando o valor interpolado por krigagem ordinária for menor que o valor simulado em um dado nó, o local é considerado interno ao domínio, caso o valor interpolado seja maior que o valor simulado o local é considerado externo ao domínio. Essa classificação é realizada para cada banco de dados completo, contemplando todos os contatos entre as litologias separadas em pares. Os resultados obtidos a partir da classificação para a realização 2 são apresentados na Figura 4-39.

As realizações representam os diversos cenários equiprováveis para as zonas de incerteza divididas em duas categorias. Entretanto, para a construção do modelo geológico é necessário estabelecer critérios para a hierarquização das categorias. Eles permitem a construção das realizações do modelo geológico ao agrupar as litologias em um mesmo modelo e decidir qual categoria é adicionada a cada nó do grid. Os critérios estabelecidos para a construção do modelo são apresentados na Figura 4-37.

As categorias são agrupadas respeitando as realizações de cada simulação, consequentemente, a realização 2 obtida nas simulações de cada grupo são utilizadas

para a construção da realização 2 do modelo final hierarquizado. A categoria 0 do estéril, por exemplo, é atribuída ao nó do grid caso satisfaça duas condições prévias: pertença a região do grid do banco de dados I que apresente valores menores que um e pertença a região do banco de dados II com valores menores do que 1.

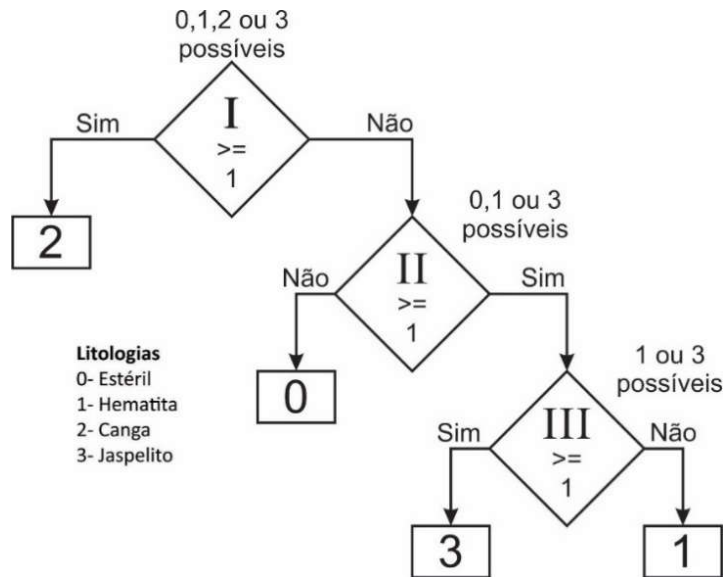


Figura 4-37: A imagem exibe as regras estabelecidas para a construção dos modelos geológicos.



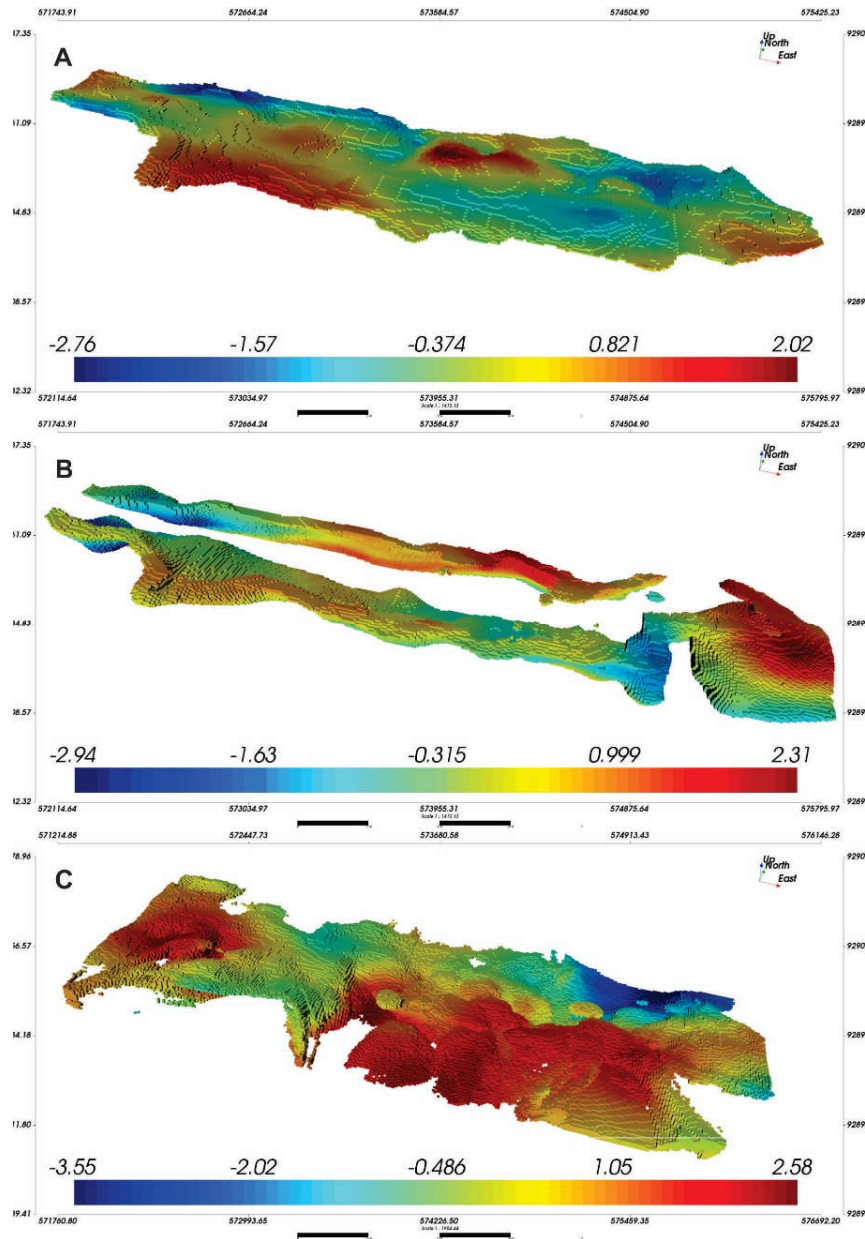


Figura 4-38: A figura retrata a realização 2 obtida na simulação não condicional das zonas de incerteza. Zona de incerteza para o grupo I em A. Zona de incerteza para o grupo II em B. e Zona de incerteza para o grupo III em C. A escala de cores está associada aos valores obtidos na realização 2 da simulação não condicional de cada zona de incerteza.

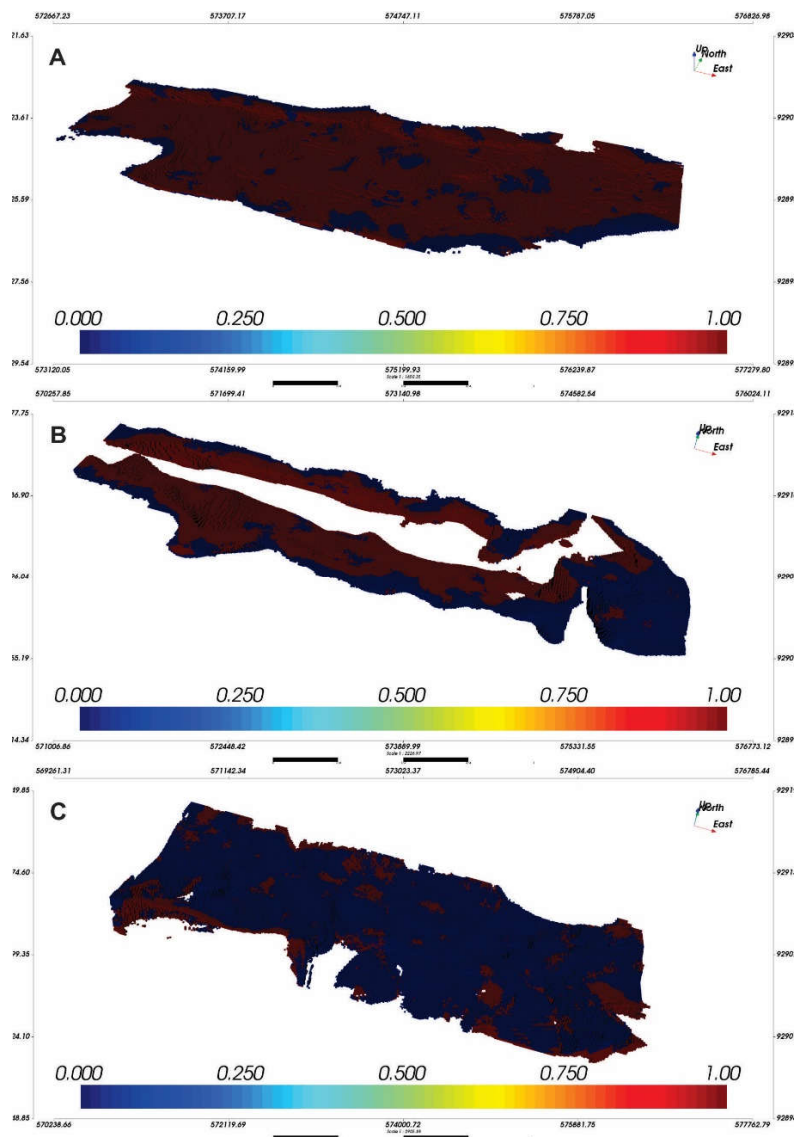


Figura 4-39: A figura exibe as zonas de incerteza classificadas a partir da comparação das simulações e as interpolações em cada zona de incerteza. A escala de cores representa se um determinado local pertence ou não ao domínio de interesse, caso o local pertença ao domínio o mesmo recebe a cor vermelha, caso contrário recebe a cor azul.

Como resultado do método proposto, múltiplas realizações para o modelo geológico são geradas, e a diferença entre os contatos da zona de incerteza estabelece a incerteza volumétrica dos domínios. A Figura 4-40 apresenta quatro realizações do modelo geológico obtido pelo método do parâmetro C hierárquico.

As realizações 0, 5, 10 e 15 de cada categoria são apresentadas nas figuras abaixo e tornam evidente a grande variabilidade obtida na simulação para cada categoria. As quatro realizações dos estereis da Figura 4-41 revelam a existência de blocos isolados e dispersos em 1, e na região 2 é demonstrada a variabilidade do modelo ao comparar a existência e ausência de blocos nessa região. As regiões demarcadas nas realizações da canga superficial na Figura 4-43 exibem a diferença

possível entre realizações a partir da presença ou ausência do conjunto de blocos que geram buracos no modelo. Da mesma forma, a variabilidade da hematita e dos jaspelitos pode ser identificada nas regiões demarcadas na Figura 4-42 e na Figura 4-44. Nesta última é possível observar a presença de blocos isolados e espaçados que buscam reproduzir as lentes de jaspelito.

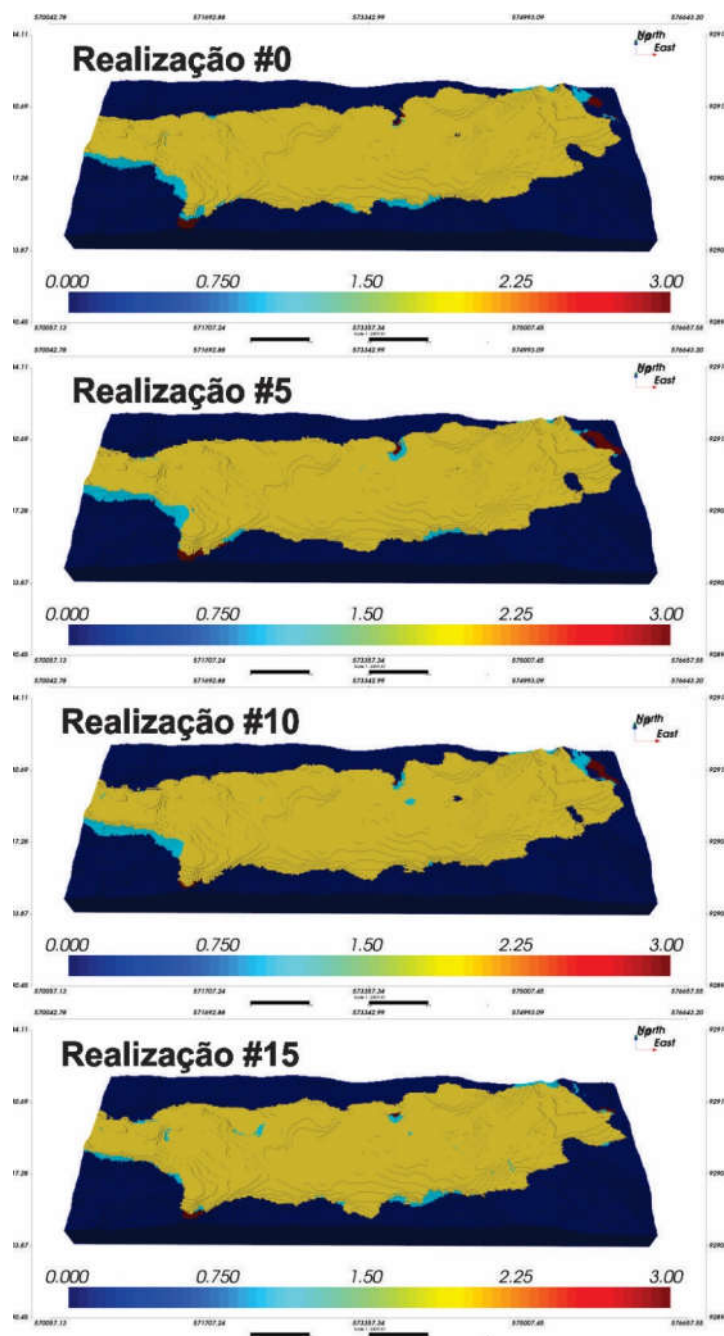


Figura 4-40: A figura exibe as realizações 0, 5, 10 e 15 do modelo geológico. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

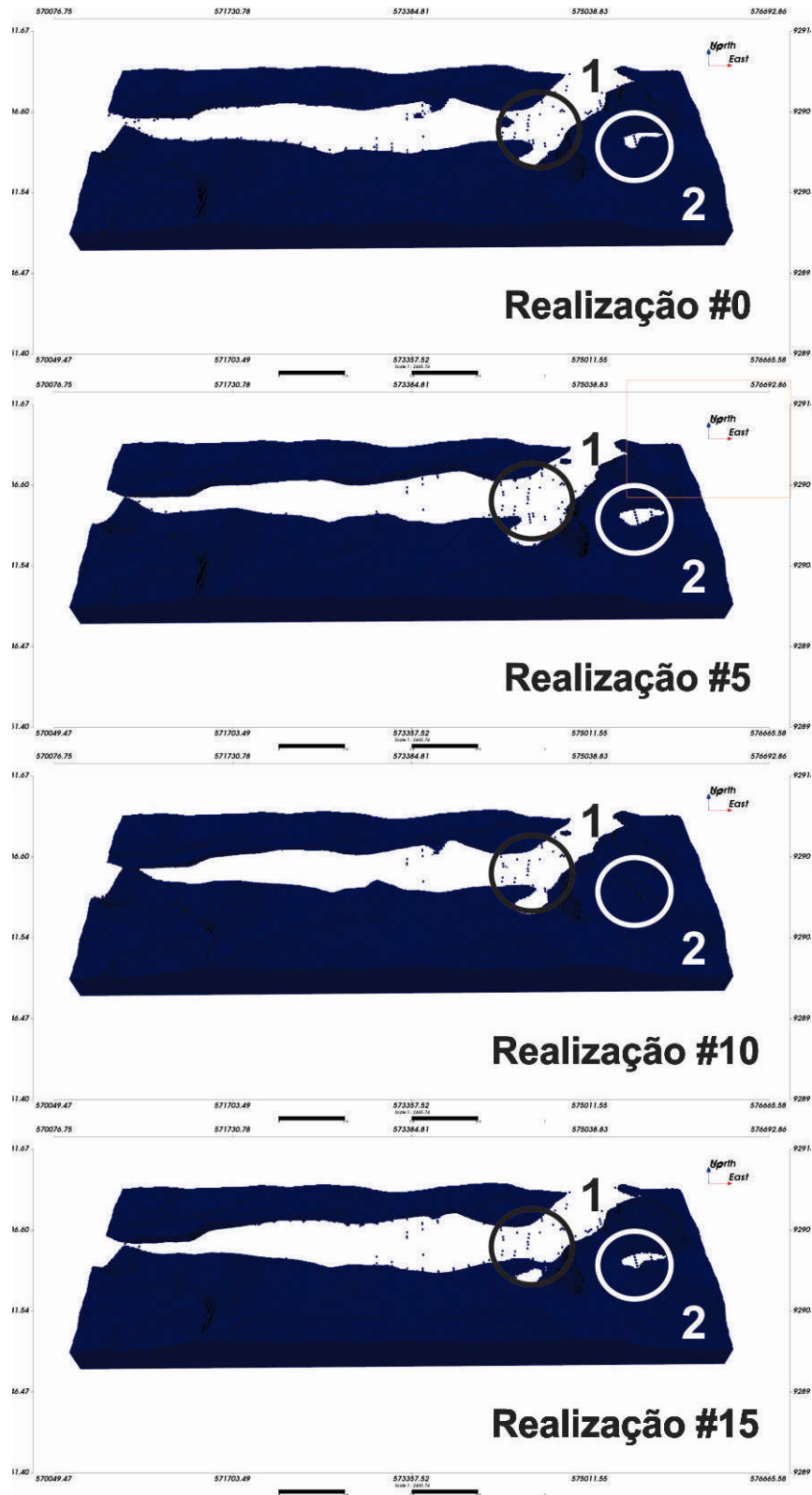


Figura 4-41: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 0 dos estéreis na cor azul escura. Note a presença de blocos isolados e dispersos em 1. Variabilidade entre modelos representada em 2.

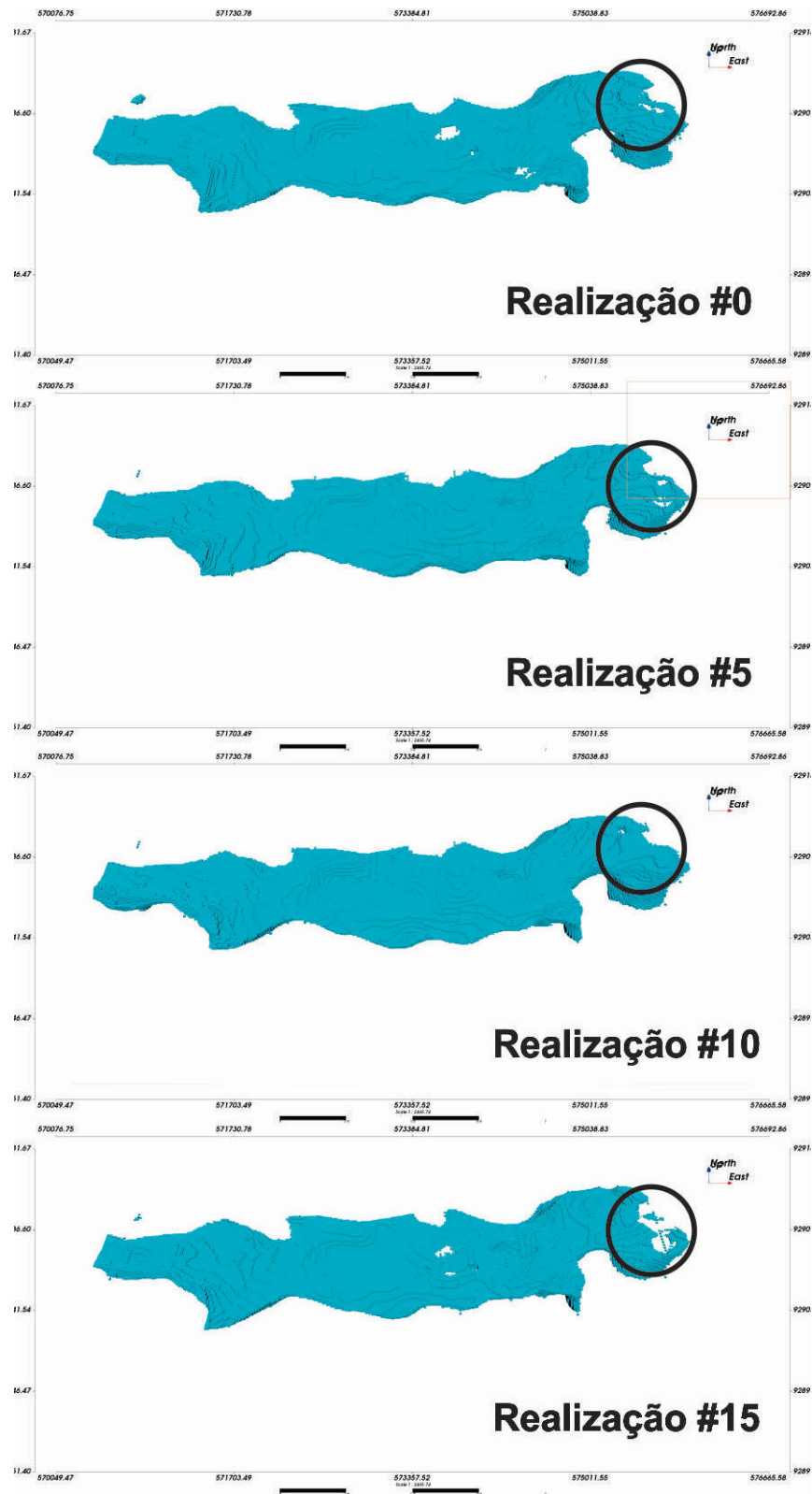


Figura 4-42: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e15 da categoria 1 da hematita na cor azul clara. A região do círculo demonstra a variabilidade entre modelos obtida na simulação.

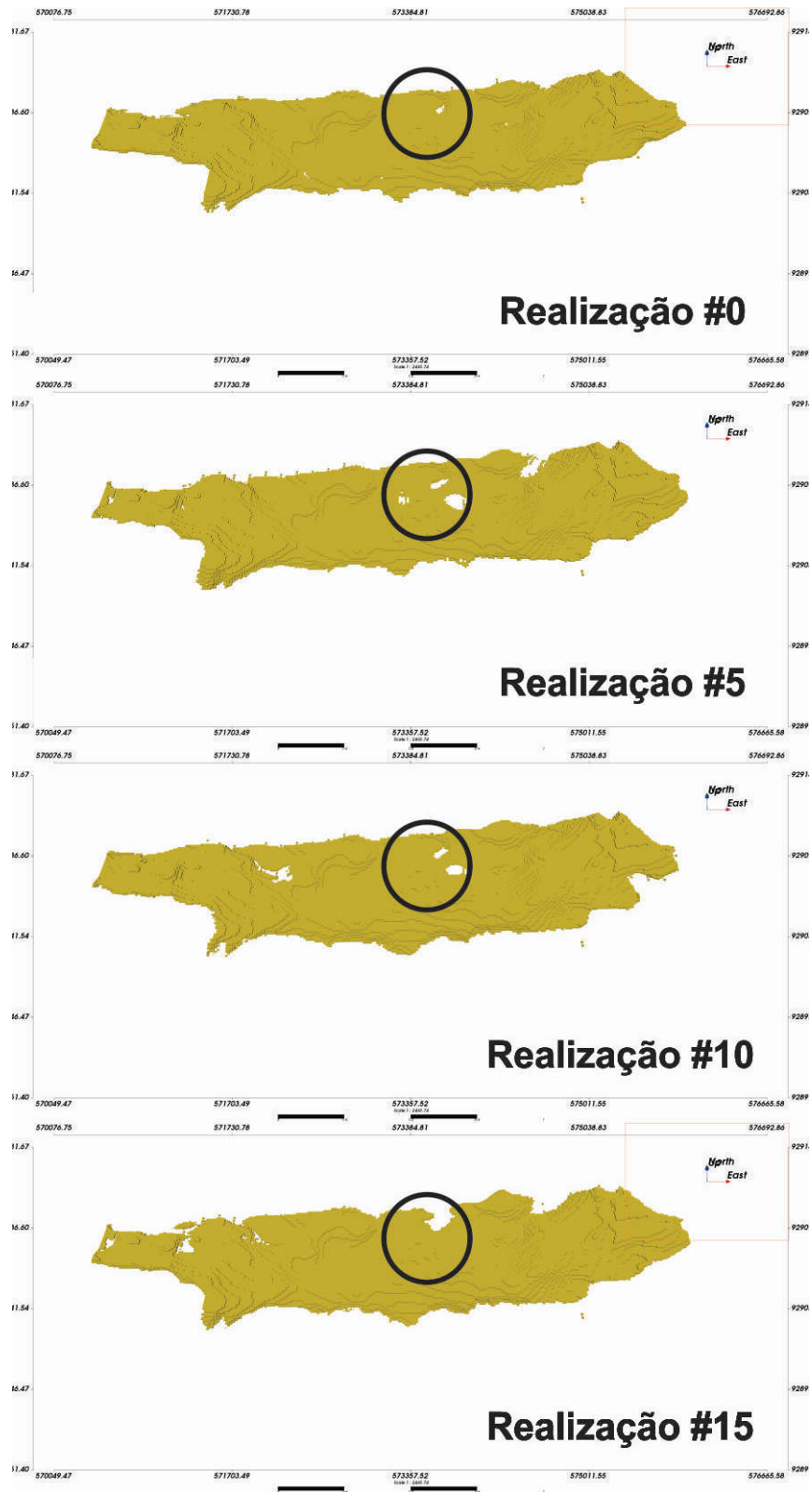


Figura 4-43: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 2 da canga superficial na cor amarela. A região demarcada demonstra a variabilidade entre modelos obtida na simulação.



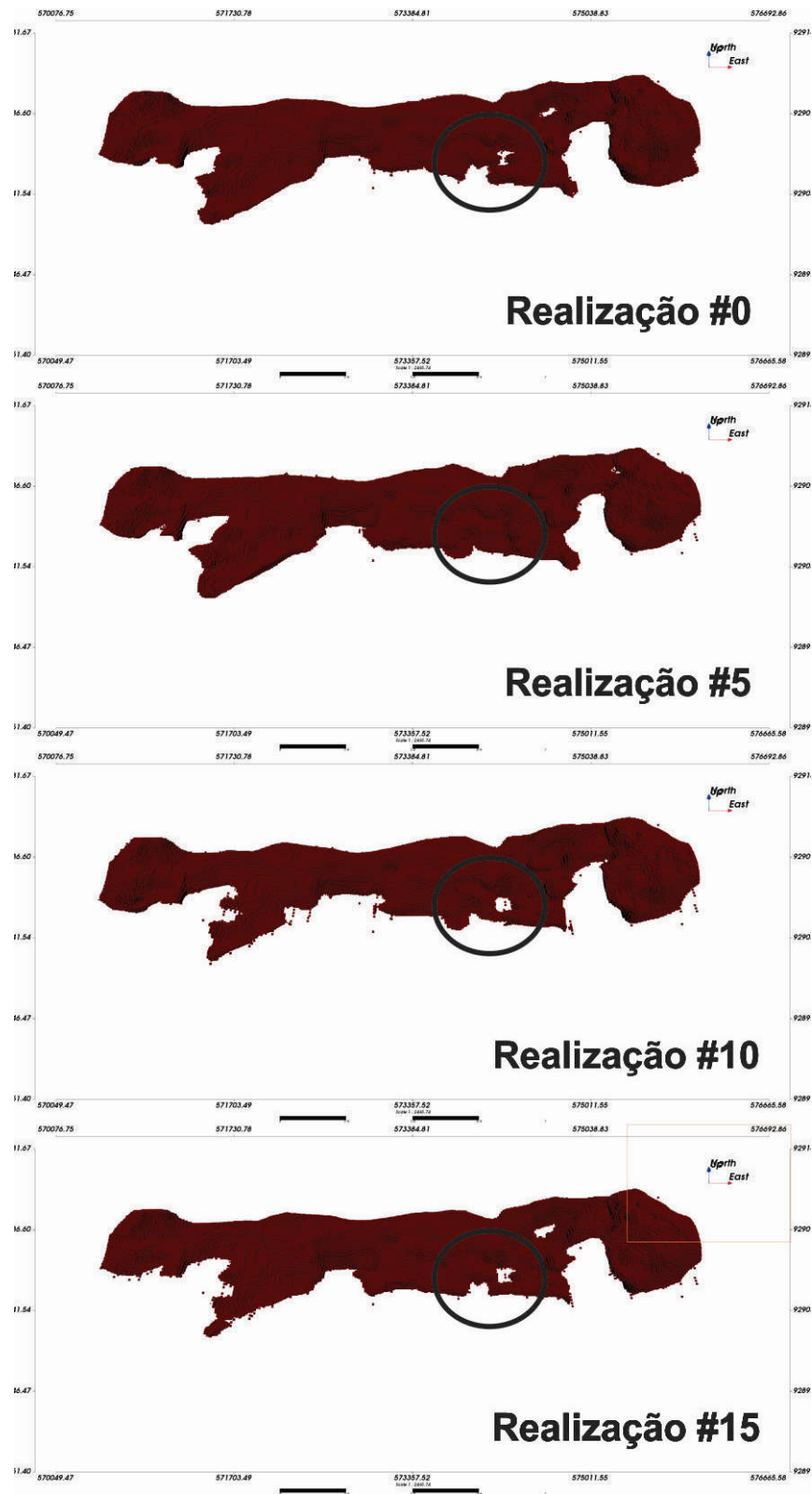


Figura 4-44: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e15 da categoria 3 dos jaspelitos na cor vermelha. Na região demarcada fica evidente a variabilidade entre realizações obtida na simulação.

### Pós-processamento e validação das realizações

As realizações do modelo geológico construídas pelo método hierárquico apresentaram estruturas consistentes e realísticas para os domínios geológicos de cada categoria. Estes resultados obtidos foram confrontados contra as amostras de furos de sondagem e seções geológicas para verificar se as realizações obtidas honraram os dados. Na Figura 4-46, é apresentada a realização 0 que de modo geral, comprova que os dados são respeitados nos modelos gerados. São apresentadas três seções leste-oeste e duas seções norte-sul para confrontar os dados e a realização 0. Note nas seções 60, 120 e 180 em Y os locais marcados pelos círculos 1 e 2 que demonstram que os dados foram honrados durante a simulação. Note em 3 que os dados de seções geológicas adicionados ao banco de dados foram respeitados na realização apresentada. Considerando as seções 100 e 300 em X os locais marcados em 5 confirmam que os dados provenientes de furos de sondagem são concordantes com as realizações. Os dados em 4 demonstram que os blocos centros de cada bloco da seção da realização coincidem com os dados das seções geológicas adicionadas ao banco de dados.

As vinte realizações construídas pelo método foram validadas ao comparar as distribuições de cada categoria das realizações e as distribuições do modelo de referência Lito4. A Figura 4-45 apresenta as proporções obtidas nas realizações que apresentam flutuações entre cada realização. Fica evidente, que a categoria 2 da canga superficial foi supervalorizada em média 9% nas realizações em relação ao modelo de referência. As demais categorias são subvalorizadas, de modo que a mais afetada foi a categoria 3 dos jaspelitos subvalorizada em 6% em média.

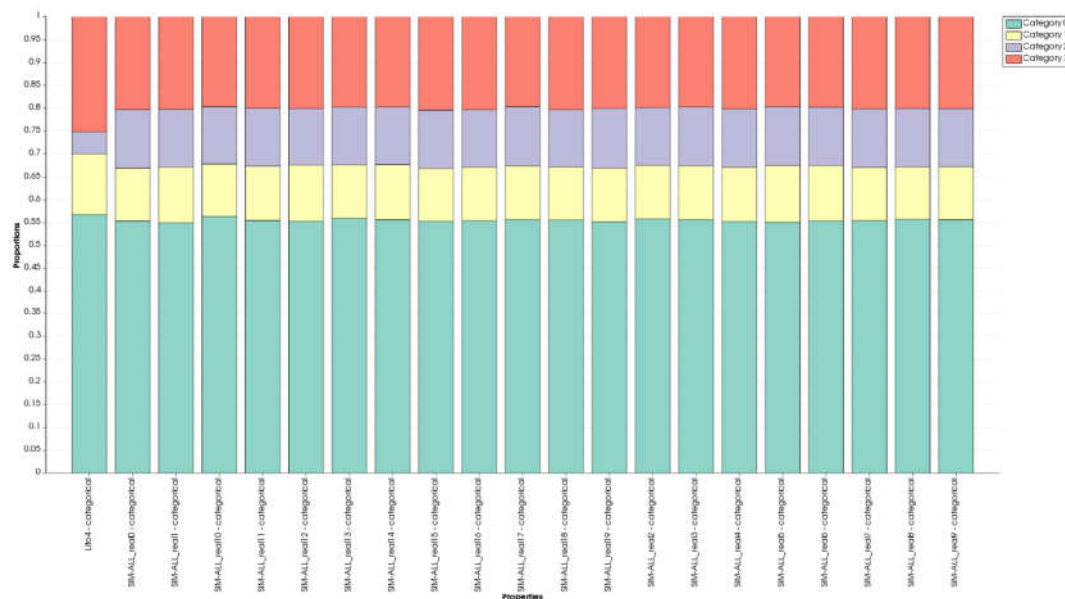


Figura 4-45: Proporção das categorias nas 20 realizações obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência. Na imagem, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estêreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.



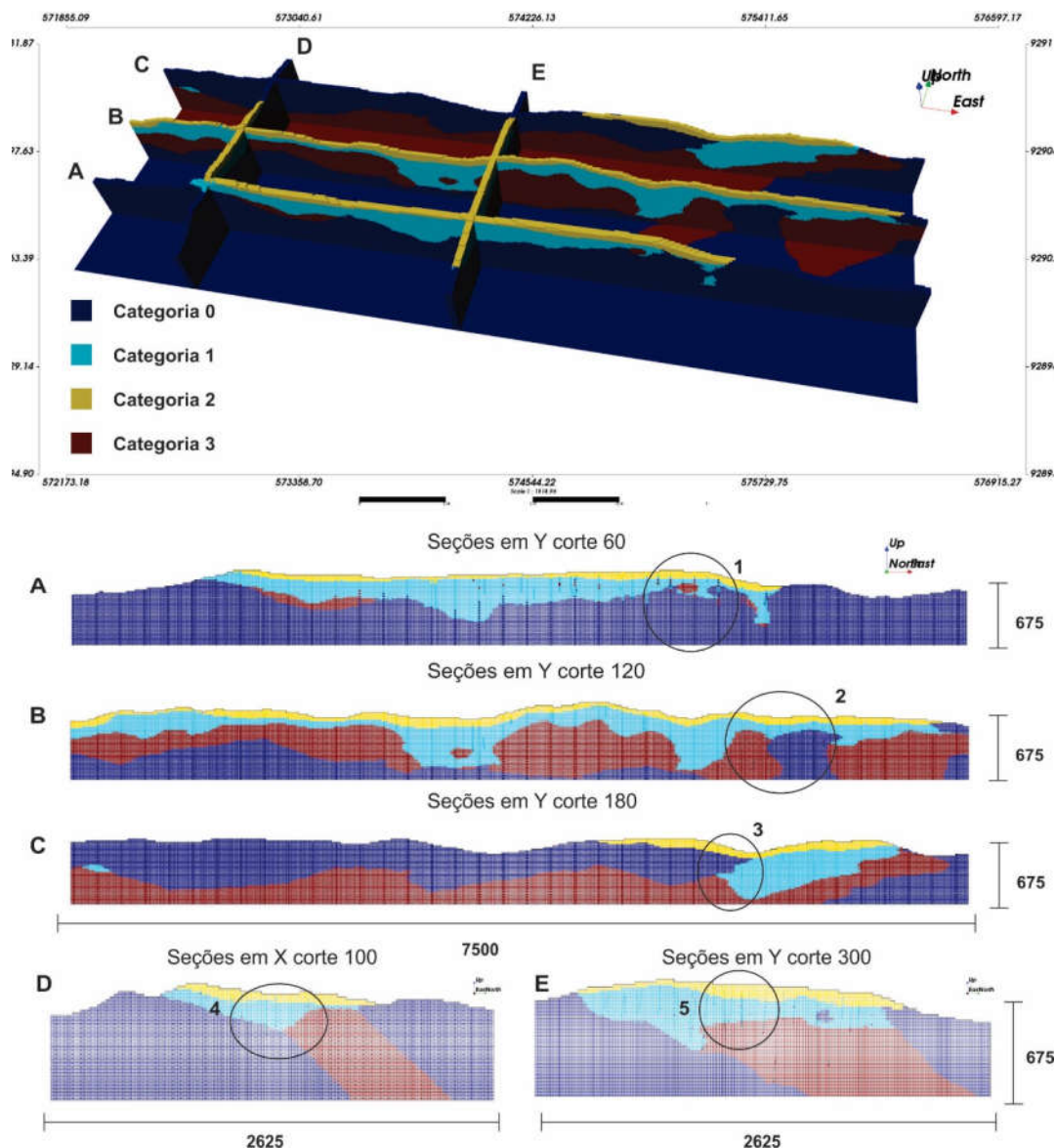


Figura 4-46: A imagem apresenta as seções verticais da realização 5, evidenciando que os dados foram honrados na simulação. Da direita para a esquerda, nas seções leste-oeste de A à C, e nas seções norte-sul em D e E. Note nas regiões demarcadas 1 e 2, que os dados provenientes de furos de sondagem foram honrados durante a simulação. A região demarcada 3 demonstra que os dados provenientes de seções geológicas acrescentadas ao banco de dados foram respeitados. Na região 4, os centroides de cada bloco coincidem com os dados provenientes de seções geológicas, e na região 5 a presença do furo de sondagem em que os dados foram honrados na realização apresentada. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

#### 4.4 Comparação entre modelos

A variabilidade espacial dos domínios geológicos atinge diretamente a avaliação de recursos minerais já que determina os volumes de minério e estéril disponíveis. Desta forma, o impacto é significativo na estimativa da tonelagem de

minério acima do teor de corte, levando a previsões enviesadas, erros no planejamento de mina, custos inesperados na operação e desvios nas receitas esperadas (Srivastava, 2005). Os gráficos apresentados a seguir descrevem a variabilidade volumétrica obtida com as diversas realizações construídas pelos três métodos: *Contactsim*, SD Sim e SD-C. As diferentes litologias simuladas são avaliadas sendo a coluna de número um referente aos estéreis, a de número dois a hematita, a de número três a canga e a de número quatro o jaspelito.

A variabilidade volumétrica obtida na simulação pelo algoritmo *contactsim* é apresentada na Figura 4-47, na qual são comparados os domínios obtidos em cada realização e o referencial. As categorias 2 e 3 apresentam variabilidade relativa pequena de 7,4% e 2,9%, enquanto os estéreis e o jaspelito apresentaram maior variabilidade de 14,6% e 13,9%, respectivamente. Ao simular os contatos entre domínios pelo método foi observado o comportamento diferenciado nas categorias 2 e 3, em que a variabilidade obtida nas realizações está distante do volume apresentado no modelo de referência. As realizações sistematicamente superestimaram a hematita em detrimento da canga superficial, que foi subestimada em todas as realizações. A pouca quantidade de informações de canga superficial no banco de dados, utilizado como condicionante para a simulação, pode ser o motivo que gerar este efeito nas realizações. Outra alternativa consiste na pequena espessura vertical da canga no modelo de referência, o que justificaria a falta de conectividade do domínio da canga estrutural, como demonstrado na Figura 4-10 das realizações da canga superficial.

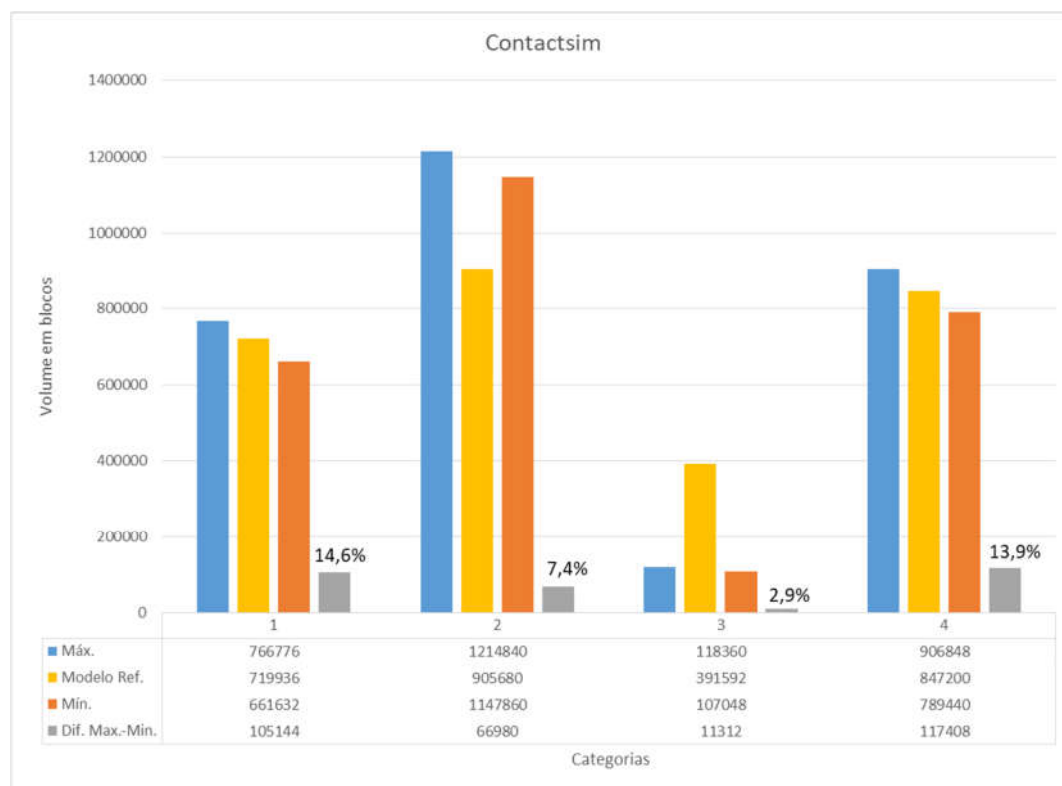


Figura 4-47: O gráfico da imagem apresenta a variabilidade obtida a partir da diferença do maior e do menor volume dos domínios obtidos para cada categoria pelo método *contactsim*. No gráfico, os estéreis são representados em 1, a hematita em 2, a canga superficial em 3 e os jaspelitos em 4.

A Figura 4-48 apresenta a variabilidade volumétrica obtida pelo método SD Sim que evidencia a pequena diferença volumétrica obtida ao comparar as realizações e o modelo de referência. As quatro categorias apresentam variabilidade pequena de no máximo 4%. Os estéreis apresentaram maior variabilidade de 3,9% entre realizações. Ao comparar os volumes obtidos nas realizações com o modelo de referência é observada uma diferença maior que a variabilidade entre as realizações em todas as categorias.

Na metodologia SD-C, a diferença é expressiva entre os valores máx/min com variação entre realizações de 13,5% para a canga e 10% para a hematita, e pequena variabilidade para os estéreis de 2,8% e o jaspelito de 3,7%. Essa variabilidade, evidenciada pela simulação dos domínios, demonstra a necessidade da avaliação da incerteza e o possível impacto no empreendimento mineral. Vale ressaltar que o volume de cada domínio do modelo de referência, com exceção a hematita, pertence ao intervalo de variabilidade das realizações, o que torna a variabilidade consistente para a avaliação da incerteza.

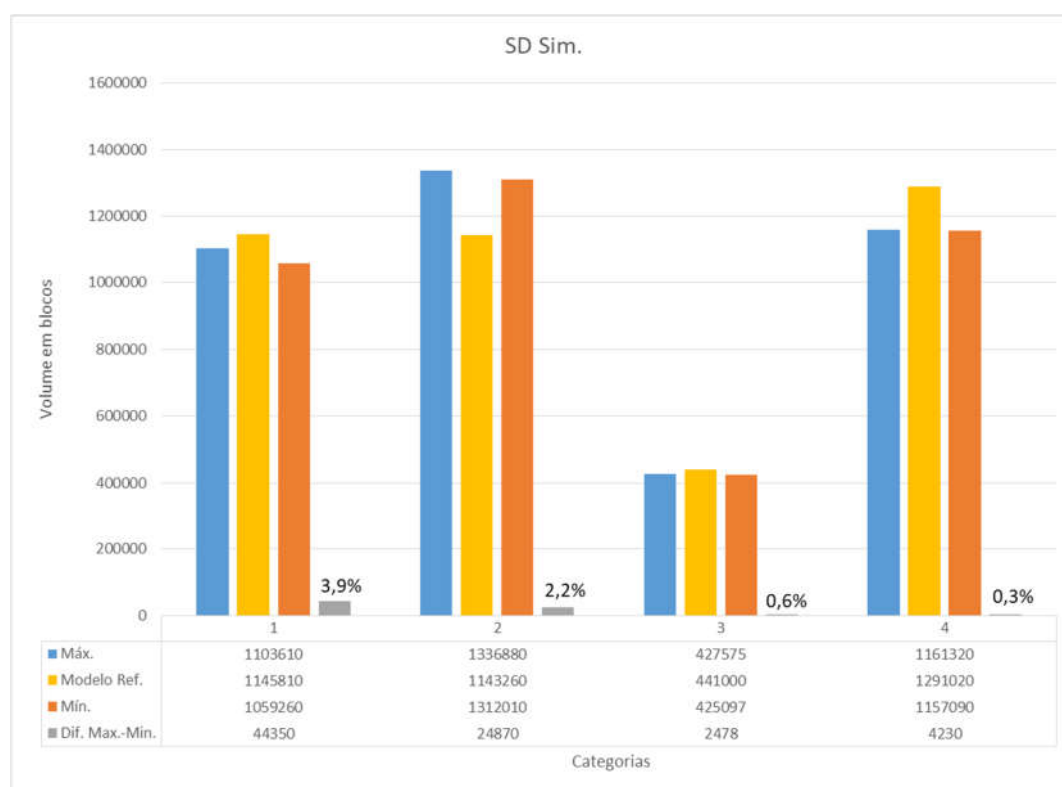


Figura 4-48: O gráfico da imagem apresenta a variabilidade obtida a partir da diferença do maior e do menor volume dos domínios obtidos para cada categoria pelo método SD Sim. No gráfico os estéreis são representados em 1, a hematita em 2, a canga superficial em 3 e os jaspelitos em 4.

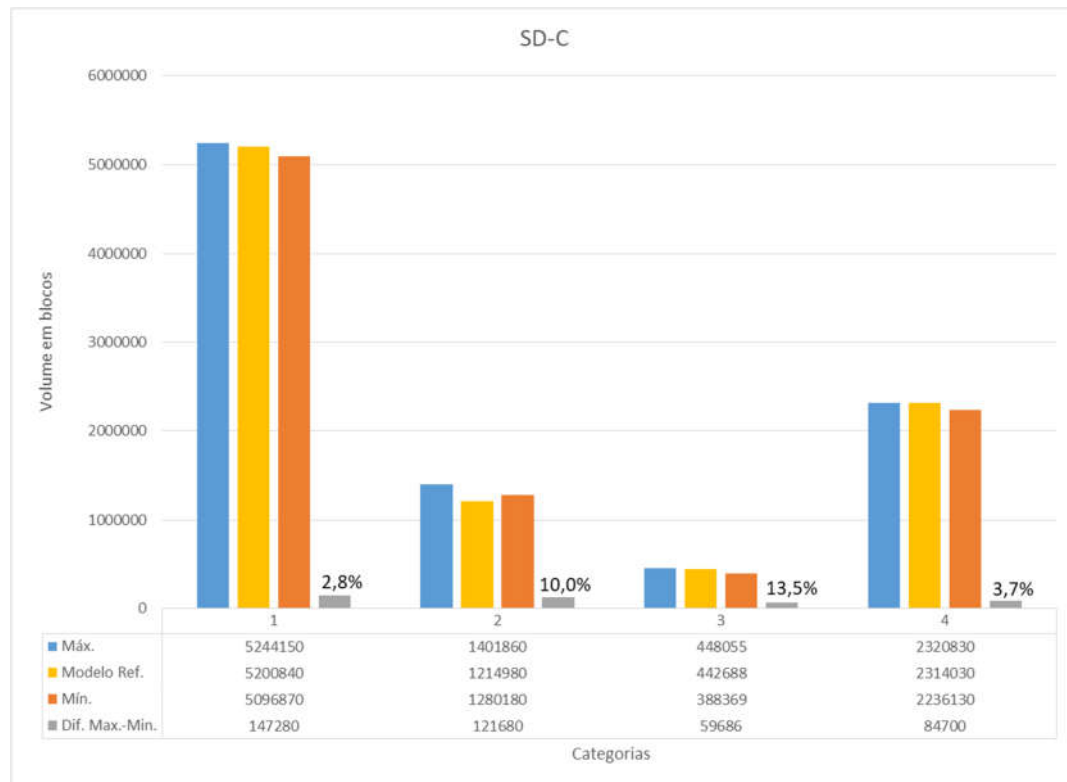


Figura 4-49: O gráfico da imagem apresenta a variabilidade obtida a partir da diferença do maior e do menor volume dos domínios obtidos para cada categoria pelo método SD-C. No gráfico os estéreis são representados em 1, a hematita em 2, a canga superficial em 3 e os jaspelitos em 4.

As múltiplas realizações dos contatos geológicos permitem construir mapas ou modelos de probabilidade. Estes modelos possibilitam identificar a probabilidade de um dado local pertencer ou não a um determinado domínio geológico. As figuras abaixo apresentam os modelos de probabilidade das realizações obtidas pelos três métodos, um para cada litologia variando de 0% em azul a 100% em vermelho de chance de ocorrência. Os modelos estão ordenados de cima para baixo, de modo que o primeiro modelo na parte superior representa a categoria 1 do estéril enquanto o último modelo na parte inferior representa a categoria 4 do jaspelito. As regiões de incerteza são marcadas pela transição de cores e de probabilidades de ocorrência.

Note a região demarcada na Figura 4-50 que apresenta a diferença entre metodologias, e a ausência da falha preenchida por intrusivas na metodologia SD Sim, ao compara-la com as demais. A região demarcada da Figura 4-51 demonstra a diferença que existe no modelo *contactsim*, no qual a alta probabilidade de ocorrência da hematita na região superficial. Esta estrutura não ocorre nas demais metodologias, que pode ser justificada pela utilização de um banco de dados com uma menor quantidade de amostras. Uma possibilidade consiste em utilizar novos dados de condicionamento na metodologia *contactsim* para melhorar a reprodução destes domínios. Ao aplicar a metodologia com uma quantidade reduzida de amostras acreditava-se que a imagem de treinamento compensaria a falta de informação e seria suficiente para a reprodução dos padrões dos domínios. A diferença da canga

superficial na metodologia *contactsim* é perceptível a partir da variabilidade da canga superficial e a pouca conectividade do domínio (Figura 4-52). Essa diferença ocorre devido à pouca quantidade de dados disponíveis para a canga, ao comparar com as demais categorias. Os mapas de probabilidade do jaspelitos apresentados na Figura 4-53 apresentaram resultados semelhantes, com uma pequena diferença na região demarcada.

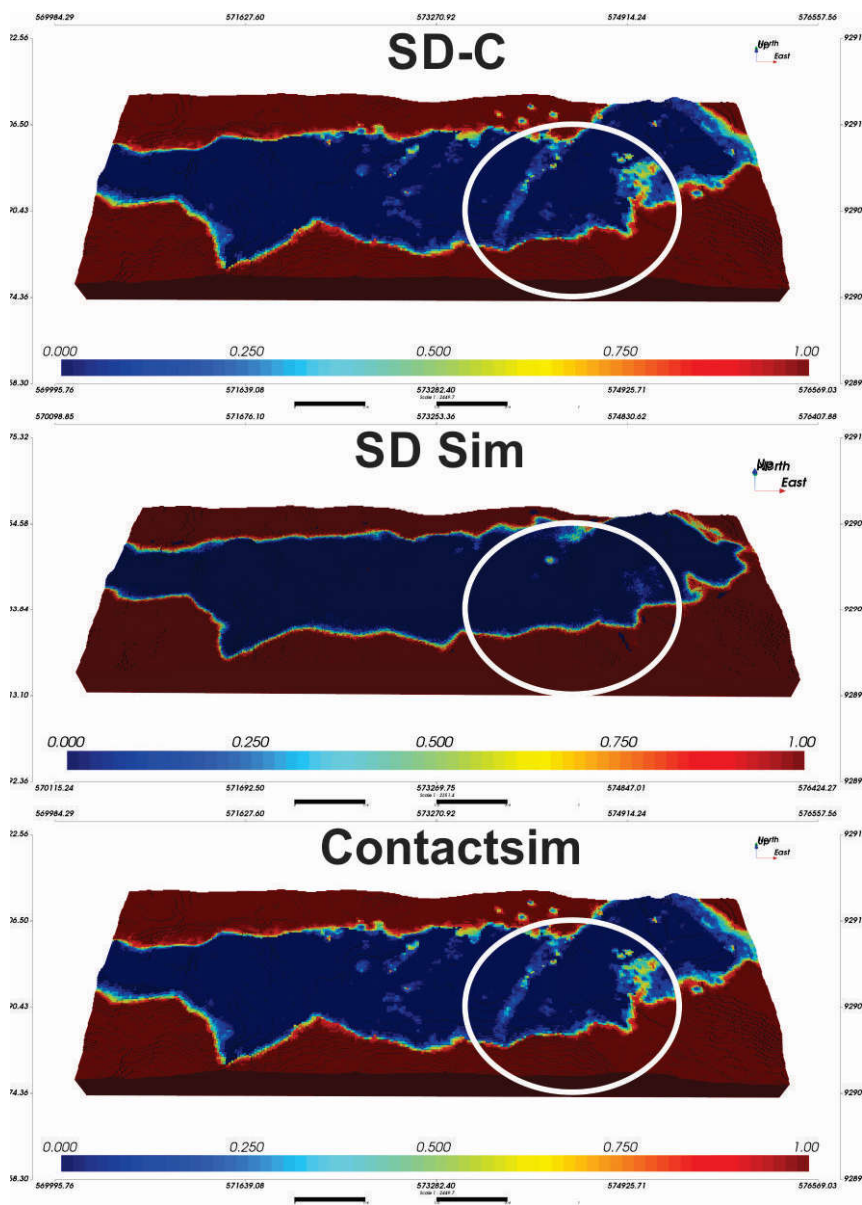


Figura 4-50: A figura exibe os mapas de probabilidade da categoria 0 referentes aos estéreis. A região demarcada demonstra a diferença entre metodologias. Note a ausência da falha preenchida por intrusivas na metodologia SD Sim. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência.

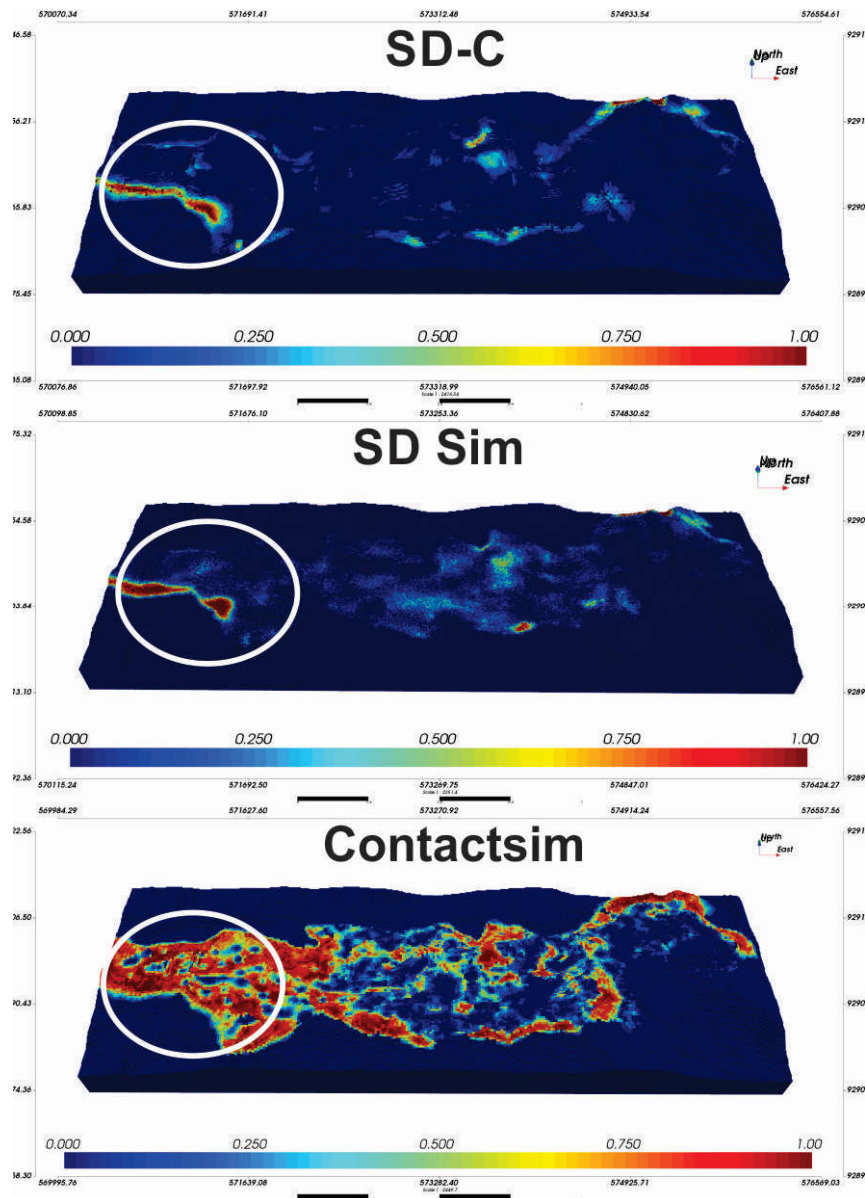


Figura 4-51: A figura exibe os mapas de probabilidade da categoria 1 referentes da hematita. A região demarcada demonstra a diferença entre metodologias. Note que no contactsim, existe alta probabilidade de ocorrência da litologia na região superficial. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência.



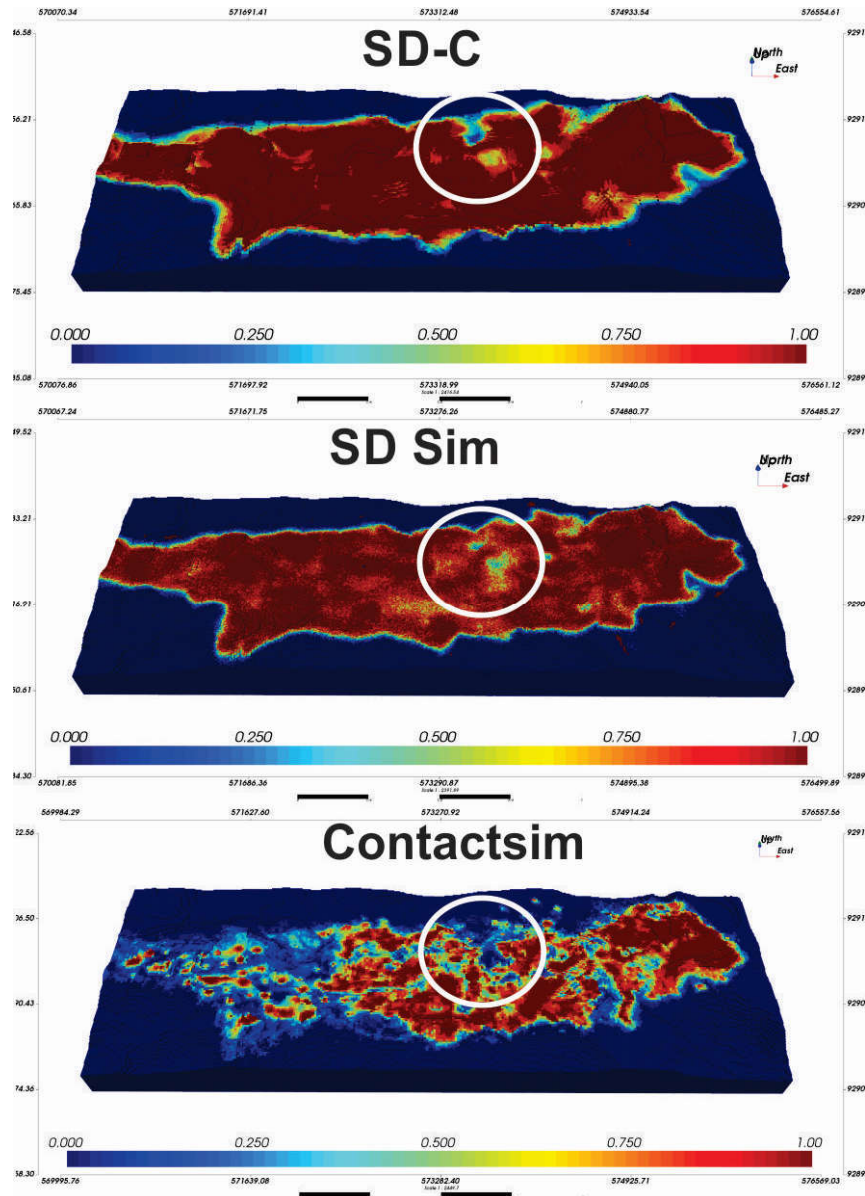


Figura 4-52: A figura exibe os mapas de probabilidade da categoria 2 referentes a canga superficial. Note, na região demarcada, a diferença entre metodologias, em especial para a metodologia contactsim que apresenta grande variabilidade para essa litologia. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência.

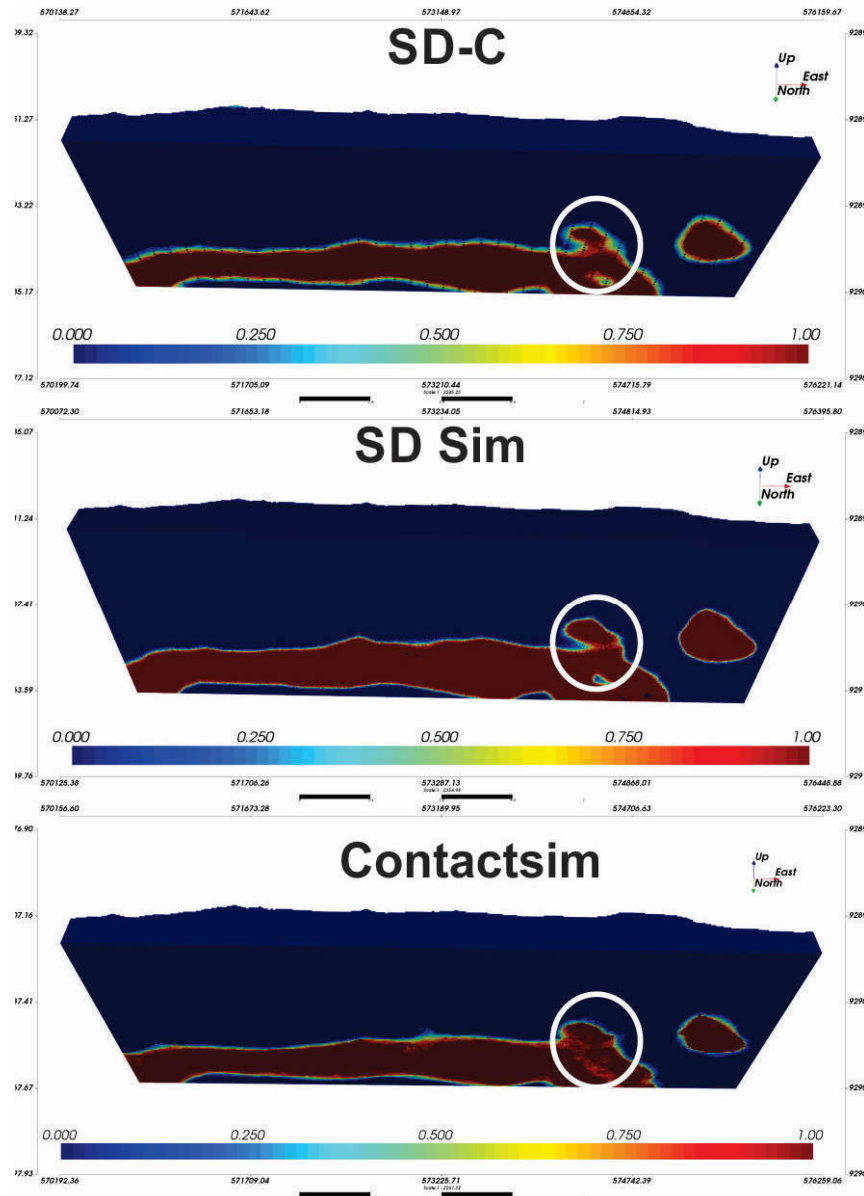


Figura 4-53: A figura exibe os mapas de probabilidade da categoria 3 referentes dos jaspelitos. A região demarcada demonstra a diferença entre metodologias. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência.

As seções geológicas apresentadas nas figuras a seguir permitem comparar os modelos gerados pelos três métodos e o modelo de referência Lito4. O principal objetivo na construção de modelos geológicos é obter figuras que apresentem sentido do ponto de vista geológico. As realizações geradas pelos três métodos apresentam estruturas realistas. Nas figuras, são apresentadas seções em Y no corte 120 e 180 e seções em X no corte 300.

A comparação inicial, na Figura 4-54 dos modelos com o modelo de referência, permite identificar a falta da falha preenchida por rochas intrusivas



presente no modelo de referência e ausente nos demais modelos, representado pelo número 2 na figura. O modelo *contactsim* tenta reproduzir a estrutura, mas apresenta descontinuidade, como exibido em 3. No mesmo modelo, aparecem blocos isolados e dispersos de jaspelito que buscam representar lentes, entretanto o formato que estão dispostos não apresenta significado geológico.

Os modelos gerados por distâncias assinaladas foram insensíveis as pequenas estruturas presentes no modelo de referência, como as intrusões e as lentes de jaspelito demonstradas em 1. Entretanto, essas estruturas menores, provavelmente, foram adicionadas a partir do conhecimento geológico do especialista em modelos geológicos responsável pelo modelo de referência, o que dificulta sua reprodução devido à falta de informação necessária para gerar de modo consistente essas estruturas. As estruturas e contatos do modelo SD Sim, representadas em 5, apresentam proporções do modelo real, mas limites muito suavizados e distantes da realidade. O modelo SD-C ao tentar reproduzir intrusivas em 6, aumenta a proporção dos estéreis ao invés de gerar estruturas descontinuas que representem as intrusivas.

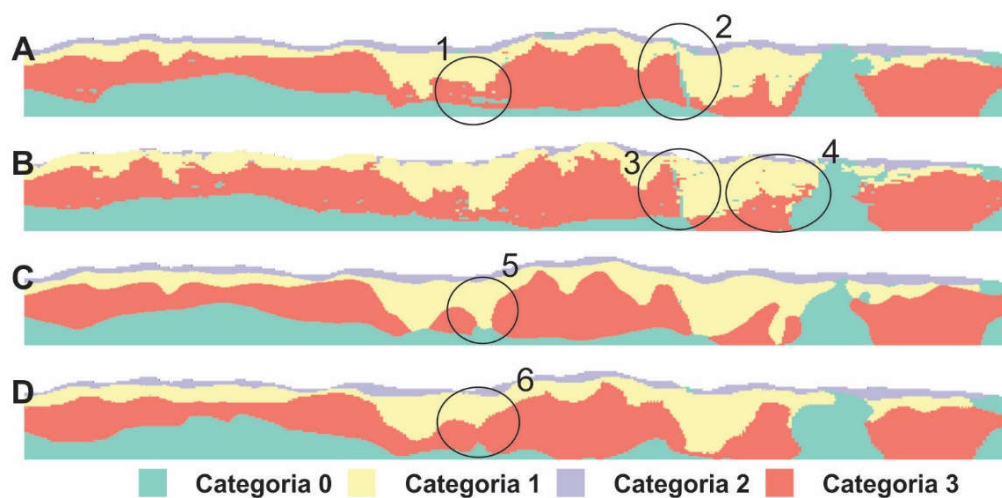


Figura 4-54: A imagem apresenta a comparação entre seções em Y corte 120. Em A, o modelo de referência Lito4, em B a realização 0 do *contactsim*, em C a realização 0 do SD Sim e em D a realização 0 do SD-C. Nas seções, a cor verde representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

Na Figura 4-55, é feita a comparação da seção em Y corte 180 entre os modelos, na qual fica evidente em 1 a dificuldade dos métodos em reproduzir a falha preenchida por intrusiva vertical presente no modelo de referência. O modelo *contactsim* consegue identificar na imagem de treinamento a presença da estrutura, mas falha ao reproduzi-la, mostrando apenas a proporção da categoria. Os demais modelos não representam a estrutura.

Outra diferença observada na Figura 4-55, consiste na ausência das lentes de jaspelito presentes no modelo Lito4 e ausentes nos modelos baseados em distâncias assinaladas. O modelo *contactsim* consegue reproduzir essas estruturas em pequena escala com uma redução do volume em relação ao modelo referência;

entretanto o modelo reproduz inúmeras intrusivas em 3 que não possuem significado geológico como blocos isolados e dispersos. O modelo SD-C, nesta seção, reproduziu intrusivas, mas com volume muito maior que o apresentado no modelo de referência.

A Figura 4-56 apresenta as seções em X do modelo de referência e uma realização de cada método. As pequenas estruturas presentes no modelo de referência em 1 são reproduzidas no modelo *contactsim*, mas estão ausentes nos dois modelos baseados em distâncias assinaladas. O contato de três litologias apresentado não é representado de modo realista no SD Sim. Apesar disso, a intrusiva presente no modelo de referência em 2 foi reproduzida apenas no modelo SD Sim.

A metodologia SD Sim é muito sensível aos parâmetros de simulação, desta forma, uma pequena mudança gera grande impacto no modelo e torna as feições geológicas pouco realistas: suaviza em excesso os contatos ou gera o efeito *salt and pepper*. O método *contactsim* apresenta duas grandes desvantagens quando comparados aos demais: necessita da construção de uma imagem de treinamento prévia e apresentou problemas na continuidade do domínios da canga superficial, o que necessita da construção de uma nova imagem de treinamento ou de mais dados de condicionamento para este domínio. Desta forma, o método SD-C foi selecionado para a construção do modelo final em razão de reproduzir melhor as proporções do modelo de referência na simulação e apresentar flexibilidade ao modelar cada domínio separadamente.

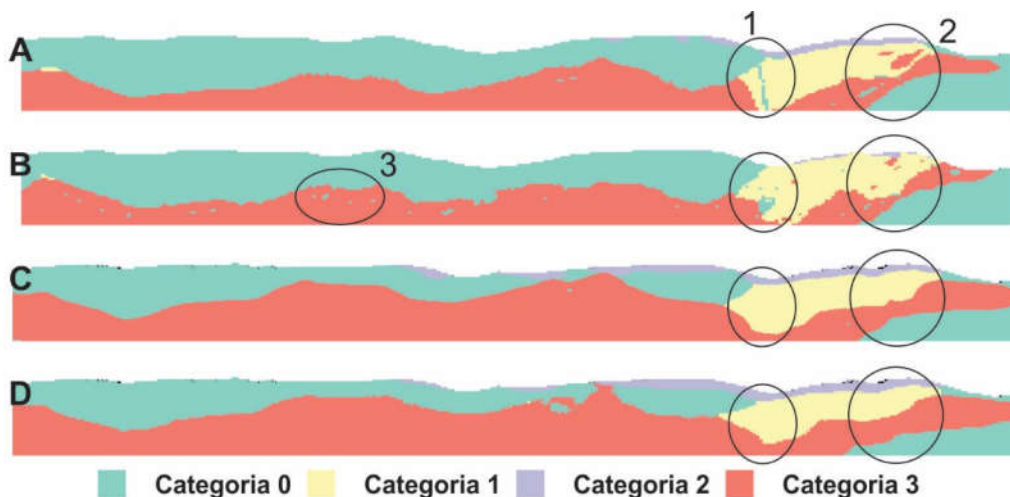


Figura 4-55: A imagem apresenta a comparação entre seções em Y corte 180. Em A, o modelo de referência Lito4, em B a realização 0 do *contactsim*, em C a realização 0 do SD Sim e em D a realização 0 do SD-C. Nas seções, a cor verde representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

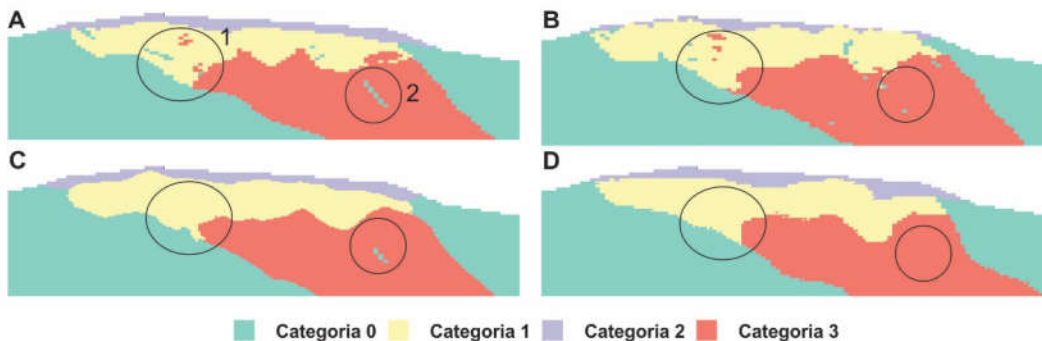


Figura 4-56: A imagem acima exibe a comparação entre seções em X corte 300. Em A, o modelo de referência Lito4, em B a realização 0 do *contactsim*, em C a realização 0 do SD Sim e em D a realização 0 do SD-C. Nas seções, a cor verde representa a categoria 0 dos estéreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

#### 4.5 Modelo final

A metodologia SD-C foi selecionada para construir o modelo final do depósito de ferro. O banco de dados original composto de diversas litologias, foi agrupado em cinco categorias de interesse para o uso neste modelo final, e novos dados provenientes de seções geológicas foram adicionados para construir um novo banco de dados que apresenta o total de 55291 amostras. Os novos dados adicionados são referentes as intrusivas possibilitaram modelar essa nova categoria.

Como discutido anteriormente, essa metodologia trabalha de forma binária, apenas um domínio deve ser avaliado por vez. É necessário que as categorias sejam divididas em conjuntos de modo a representar os controles estruturais dos litotipos de cada categoria. Neste modelo, utilizou-se cinco novos conjuntos ou grupos de dados codificados em indicadores seguindo a hierarquia apresentada na Figura 4-57. Cada conjunto possui número de amostras distinto, de modo que o primeiro banco de dados contempla todas as amostras, e os demais bancos de dados são subconjuntos do primeiro.

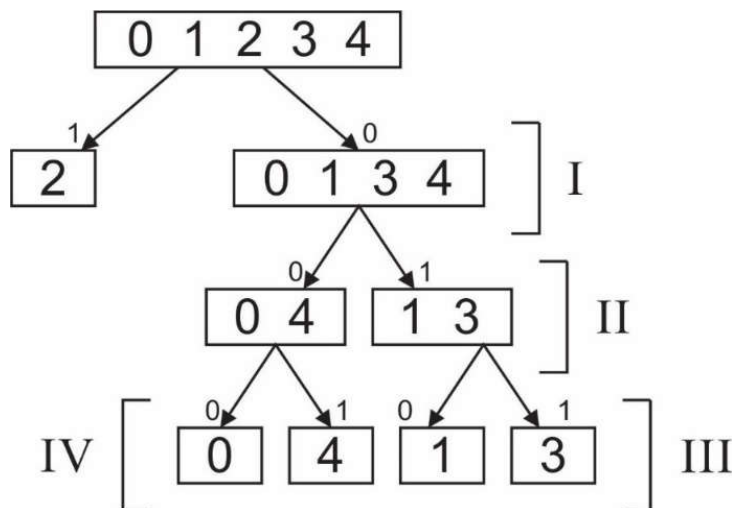


Figura 4-57: A imagem exibe a divisão hierárquica do banco de dados S11D para o modelo final.

#### 4.5.1 Distâncias assinaladas

As distâncias assinaladas foram calculadas para cada um dos grupos com o objetivo de determinar a incerteza associada aos contatos geológicos. Cada grupo recebeu um valor para o parâmetro da incerteza C de acordo com a estrutura geológica que o grupo representa: 100 para o grupo I, 75 para o grupo II, 150 para o grupo III e 50 para o grupo IV. Os valores foram adicionados às funções distância nas regiões externas ao domínio e subtraídos em regiões pertencentes ao domínio.

A Figura 4-58 apresenta as distâncias assinaladas calculadas para cada grupo, portanto os valores da legenda representam essa variação considerando valores negativos como pertencentes ao domínios de interesse e valores positivos como externos ao domínio. Por consequência, os valores muito negativos de coloração azul representam regiões dentro do domínio e cores avermelhadas quentes representam amostras fora do domínio de interesse. A transição entre as cores escuras azuladas para cores avermelhadas representa a distância calculada e a proximidade entre um tipo indicador e o tipo indicador distinto.

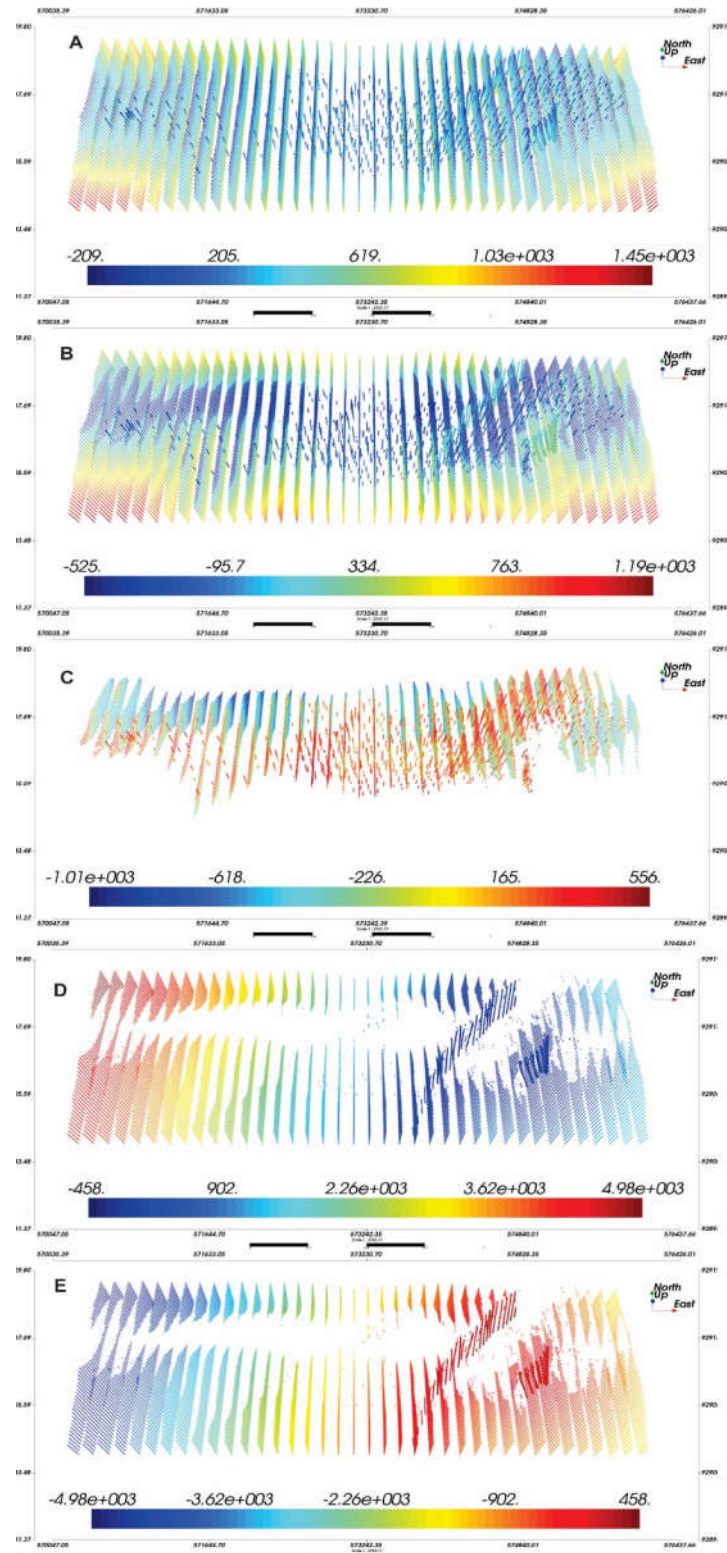


Figura 4-58: A figura apresenta as distâncias assinaladas calculadas para cada categoria. Em A, as distâncias assinaladas para o grupo I. Em B, as distâncias assinaladas para o grupo II. Em C, as distâncias assinaladas para o grupo III. Em D e E, as distâncias assinaladas para o grupo IV. A escala de cores de cores está associada a distância de um tipo categórico distinto, as cores escuras representam valores baixos os quais pertencem ao domínio de interesse, enquanto as cores vermelhas e quentes representam valores positivos, ou seja, regiões externas ao domínio de interesse.

#### 4.5.2 Continuidade Espacial

A continuidade espacial das distâncias assinaladas foi analisada para cada um dos cinco grupos. Cada grupo de dados apresentou variogramas distintos representando de maneira realista a continuidade espacial de cada domínio. A Tabela 4-11 apresenta os variogramas direcionais para cada grupo. Na análise, foi utilizado uma separação de *lag* de 50 m, número de lags de 100, tolerância de 22,5° e largura da banda de 25 metros.

Tabela 4-11: Resumo da continuidade espacial dos conjuntos de dados.

Grupo I			Grupo II			Grupo III			Grupo IV	
E.P	C 1	C 2	E.P	C 1	C 2	E.P	C 1	C 2	E.P	C 1
4500	18050	32730	5115	25580	21590	205	8200	14250	7460	22165
A 1			A 2			A 1		A 2		A 1
90°	1500	2950	90°	1050	3650	90°	1750	2900	45°	3300
00°	950	1080	00°	900	1600	00°	1260	1485	00°	750
00°	500	700	60°	400	500	00°	550	1050	60°	2025

\*C1 - contribuição da primeira estrutura. C2 - contribuição da segunda estrutura. A1 – alcance da primeira estrutura. A2 – alcance da segunda estrutura. E.P. – Efeito Pepita. 90/00: Alcances na direção de maior continuidade. 00/00: Alcances na direção intermediária. 00/90: Alcances na direção de menor continuidade.

#### 4.5.3 Interpolação das distâncias e região de incerteza

As distâncias assinaladas foram interpoladas por krigagem ordinária para todos os nós do grid. O grid com 1.624.180 blocos do modelo de referência foi utilizado na interpolação das distâncias assinaladas, suas propriedades são apresentadas na Tabela 4-1. Cada conjunto de dados foi interpolado separadamente e o menor valor de distância calculado retido e atribuído a cada nó do grid. Os diferentes parâmetros de busca utilizados na interpolação são apresentados na Tabela 4-12. Os modelos obtidos na interpolação das distâncias e a sua distribuição são apresentados na Figura 4-60.

As distribuições obtidas na interpolação de cada grupo são apresentadas na Figura 4-59, utilizadas posteriormente na construção da zona de incerteza. Essa região de incerteza entre domínios é obtida a partir do resultado da krigagem ordinária ao selecionar os valores de -C e +C como limites da distribuição, e estabelecer a região entre eles como zona de incerteza. Esta região será utilizada na simulação não-condicional e construção das múltiplas realizações dos limites entre domínios.

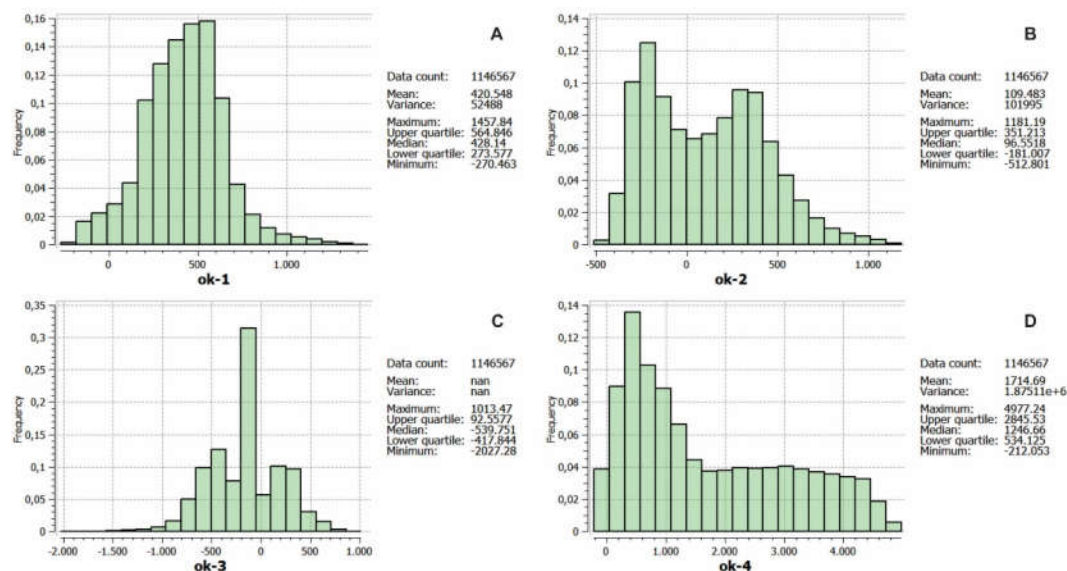


Figura 4-59: A figura apresenta os histogramas dos valores obtidos com krigagem ordinária das funções distâncias para cada grupo. A imagem A representa o histograma da interpolação do grupo I. A imagem B representa o histograma da interpolação do grupo II. A imagem C representa o histograma da interpolação do grupo III. A imagem D representa o histograma da interpolação do grupo IV.

Tabela 4-12: Parâmetros de busca utilizados na interpolação das distâncias.

KRIGAGEM ORDINÁRIA					
Direção do elipsoide		Alcance (m)		Quantidade de amostras	
<b>Grupo I</b>					
Azimute	90º	Máximo	1500	Máximo	55
Mergulho	00º	Médio	1000	Mínimo	1
Inclinação	00º	Mínimo	500		
<b>Grupo II</b>					
Azimute	90º	Máximo	3500	Máximo	55
Mergulho	00º	Médio	1500	Mínimo	1
Inclinação	60º	Mínimo	500		
<b>Grupo III</b>					
Azimute	90º	Máximo	2000	Máximo	55
Mergulho	00º	Médio	1500	Mínimo	1
Inclinação	00º	Mínimo	1000		
<b>Grupo IV</b>					
Azimute	45º	Máximo	3300	Máximo	55
Mergulho	00º	Médio	750	Mínimo	1
Inclinação	60º	Mínimo	2000		



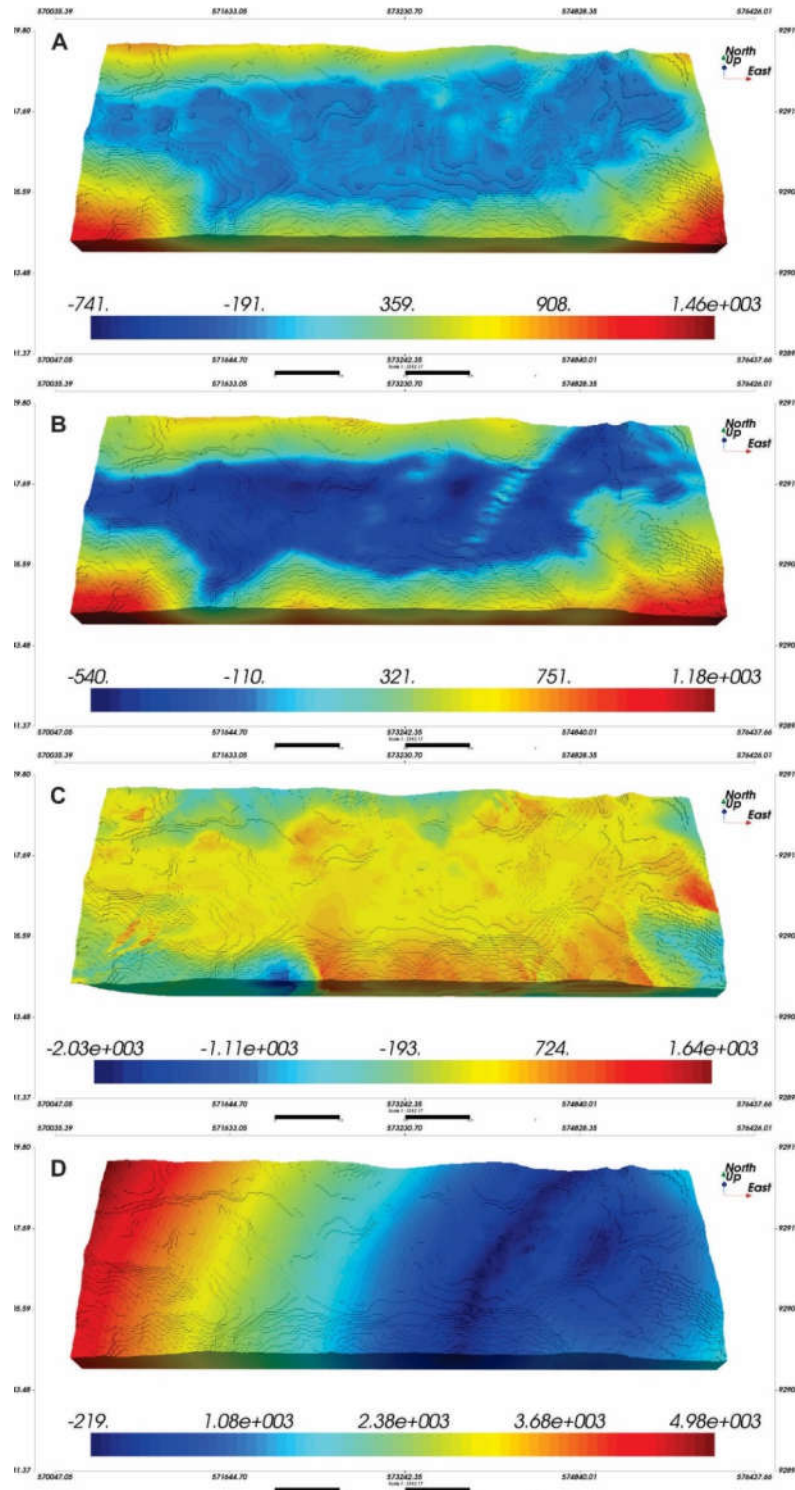


Figura 4-60: Modelos obtidos por krigagem ordinária das funções distâncias para cada grupo. A imagem A representa a interpolação do grupo I. A imagem B representa a interpolação do grupo II. A imagem C representa a interpolação do grupo III. A imagem D representa a interpolação do grupo IV. A escala de cores está associada aos valores da função distância modificada interpolados para cada local do grid, valores negativos menores que  $-C$  pertencem ao domínio e valores positivos maiores que  $+C$  externos ao domínio. A região que reúne os valores entre  $-C$  e  $+C$  será determinada como zona de incerteza.



A Figura 4-61 apresenta as zonas de incerteza estabelecidas para as quatro interpolações dos grupos de dados. O valor adotado anteriormente para o parâmetro C em cada grupo foi novamente utilizado para a construção das regiões de incerteza. Para a construção da zona de incerteza do grupo I, por exemplo, foi adotado o valor de 100 para o parâmetro C. Na imagem A, da figura está representada a zona de incerteza do grupo I, na imagem B a zona de incerteza do grupo II, em C a zona de incerteza do grupo III e em D a zona de incerteza do grupo IV. Note a presença da zona de incerteza gerada a partir do grupo IV. Esta região representa a incerteza associada a falha preenchida por intrusivas, que não era representada nos três modelos iniciais.

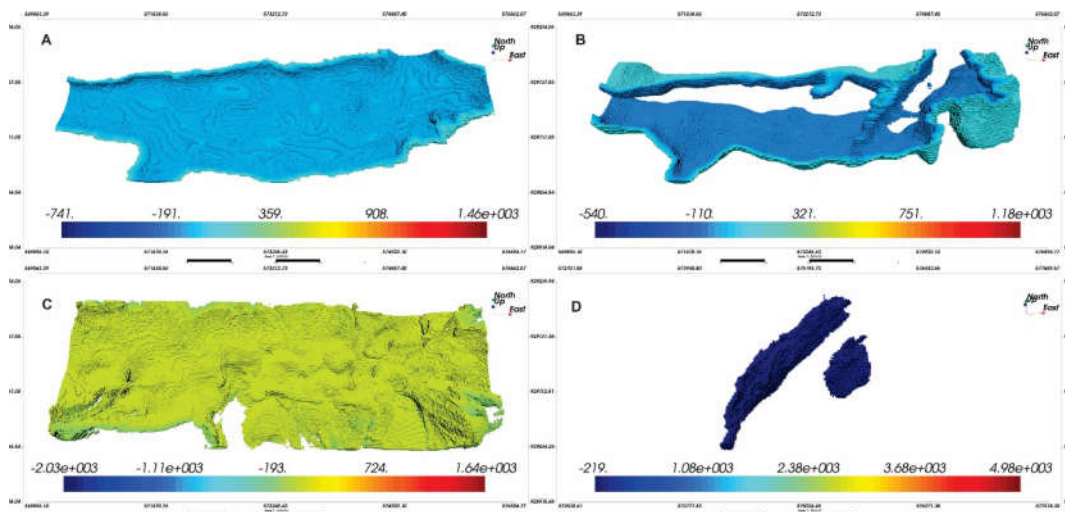


Figura 4-61: A figura apresenta as zonas de incertezas obtidas para cada conjunto de dados. Zona de incerteza para o grupo I em A. Zona de incerteza para o grupo II em B. Zona de incerteza para o grupo III em C. Zona de incerteza para o grupo IV em D. As cores de cada imagem estão associadas aos valores entre  $-C$  e  $+C$  que determinam a zona de incerteza.

#### 4.5.4 Simulação

A simulação não-condicional utilizou um novo grid reduzido o espaçamento entre nós pela metade em relação ao grid da interpolação (Tabela 4-5). O método da simulação sequencial gaussiana foi utilizado a partir dos parâmetros apresentados na Tabela 4-13, na construção de 100 realizações de cada zona de incerteza, no total de 400 realizações para todos dos grupos de dados. Na região esquerda da Figura 4-62, são apresentadas uma realização para cada zona simulada. A primeira imagem no canto superior esquerdo representa a realização 82 da simulação do grupo I. As demais imagens representam uma realização das simulações dos demais grupos ordenados de cima para baixo.

As realizações dos limites entre domínios são obtidas ao classificar a zona de incerteza. Valores interpolados por krigagem menores que os valores simulados são considerados como pertencentes ao domínio, já valores interpolados maiores são considerados como não pertencentes. Essa classificação é realizada para cada realização da simulação de cada zona de incerteza, construindo todos os contatos entre as litologias. Os resultados obtidos a partir da classificação para a realização 82 são apresentados na região direita da Figura 4-62.

Tabela 4-13: Parâmetros de continuidade espacial utilizados na simulação não-condicional.

SIMULAÇÃO							
Direção do elipsoide		Alcance (m)		Direção do elipsoide		Alcance (m)	
<b>Grupo I</b>				<b>Grupo III</b>			
Azimute	90°	Máximo	1500	Azimute	90°	Máximo	2000
Mergulho	00°	Médio	1000	Mergulho	00°	Médio	1500
Inclinação	00°	Mínimo	500	Inclinação	00°	Mínimo	1000
<b>Grupo II</b>				<b>Grupo IV</b>			
Azimute	90°	Máximo	3500	Azimute	45°	Máximo	3300
Mergulho	00°	Médio	1500	Mergulho	00°	Médio	750
Inclinação	60°	Mínimo	500	Inclinação	60°	Mínimo	2000

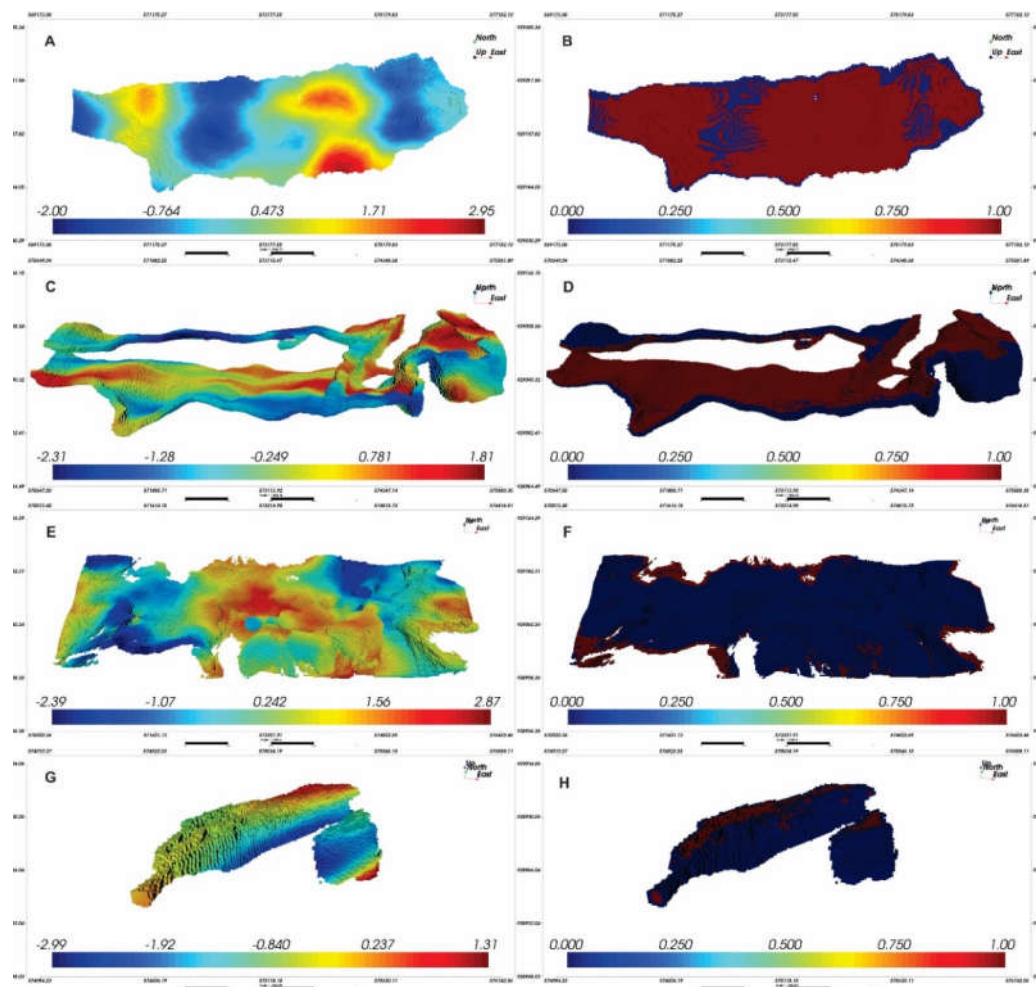


Figura 4-62: A figura apresenta as zonas de incerteza simuladas na parte esquerda e as zonas de incerteza classificadas na parte direita. As imagens A, C, E e G representam a realização 82 da simulação de cada zona de incerteza. A escala de cores destas imagens está associada aos valores obtidos na realização da simulação não condicional de cada zona de incerteza. As imagens B, D, F e H apresentam a classificação das zonas de incerteza. As zonas de incerteza estão ordenadas de cima para baixo e representam cada um dos grupos de dados. A escala de cores representa se um determinado local pertence ou não ao domínio de interesse, caso o local pertença ao domínio o mesmo recebe a cor vermelha, caso contrário recebe a cor azul.

A classificação permite obter diversos cenários equiprováveis para os limites entre domínios divididas em duas categorias. Entretanto, para a construção do modelo geológico, é necessário estabelecer critérios para a hierarquização das categorias, o que possibilita agrupar as litologias e gerar as realizações do modelo geológico. Os critérios estabelecidos para determinar qual categoria é adicionada aos nós do grid é apresentado na Figura 4-63. De acordo com essa hierarquia, existem duas possibilidades para construir as realizações do modelo geológico, a primeira consiste em codificar a categoria 4 das rochas intrusivas e a categoria 0 dos estéreis de modo independente resultando no modelo com cinco categorias apresentado na imagem C da Figura 4-64. A segunda possibilidade consiste em classificar as rochas intrusivas e os estéreis como categoria 0 como apresentado na imagem A da mesma figura. Com o objetivo de possibilitar a comparação com o modelo de referência Lito4, a segunda possibilidade foi adotada para a construção das realizações do modelo geológico final.

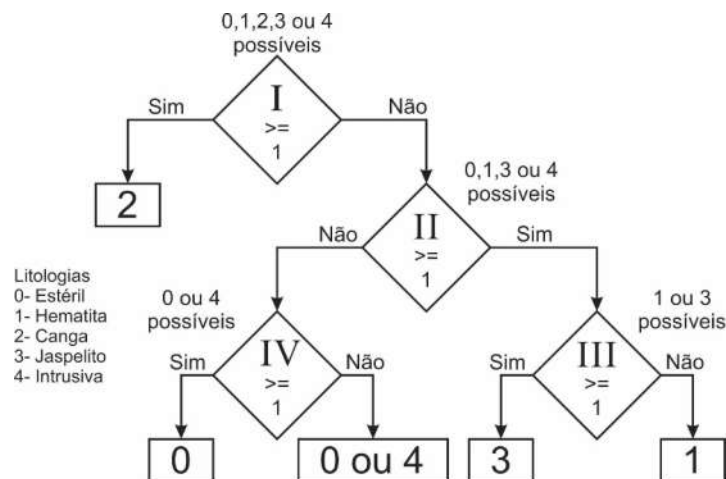


Figura 4-63: A figura apresenta as regras estabelecidas para a construção das realizações dos modelos.

Considerando a hierarquia proposta, para que categoria 0 do estéril seja atribuída ao nó do grid, é necessário satisfazer duas condições prévias: pertença a região do grid do banco de dados I que apresente valores menores que um e pertença a região do banco de dados II com valores menor do que 1. Assim como adotado na construções das realizações SD-C, as categorias são agrupadas respeitando as realizações de cada simulação. Desta forma, a realização 10 obtida nas simulações de cada grupo são utilizadas para a construção da realização 10 do modelo final hierarquizado. As realizações 4, 66, 79 e 82 de cada categoria são apresentadas na nas figuras abaixo e tornam evidente a grande variabilidade obtida na simulação para cada categoria. As quatro realizações dos estéreis da Figura 4-65 revelam a variabilidade obtida ao simular independentemente a falha preenchida por estéreis. Da mesma forma, a variabilidade dos estéreis acarretada pela presença da intrusiva exerce influência nas nas realizações das demais categorias como demonstrado nas regiões demarcadas das figuras 4-67 da canga superficial e 4-68 dos jaspelitos. A

variabilidade da hematita é representada na Figura 4-66 que também sofre pequena influência da intrusiva.

Ao agrupar os domínios para cada realização são obtidas as múltiplas realizações para o modelo, e a diferença entre os contatos da zona de incerteza estabelece a incerteza volumétrica dos domínios. A Figura 4-69 apresenta as mesmas quatro realizações agrupadas no modelo geológico final obtido pelo método do parâmetro C hierárquico. Vale destacar, a variabilidade obtida ao comparar as quatro realizações apresentadas na figura. Note a variabilidade apresentada em 1 obtida pela simulação independente da região da falha, e na região 2 da variabilidade da hematita e do jaspelitos entre realizações.

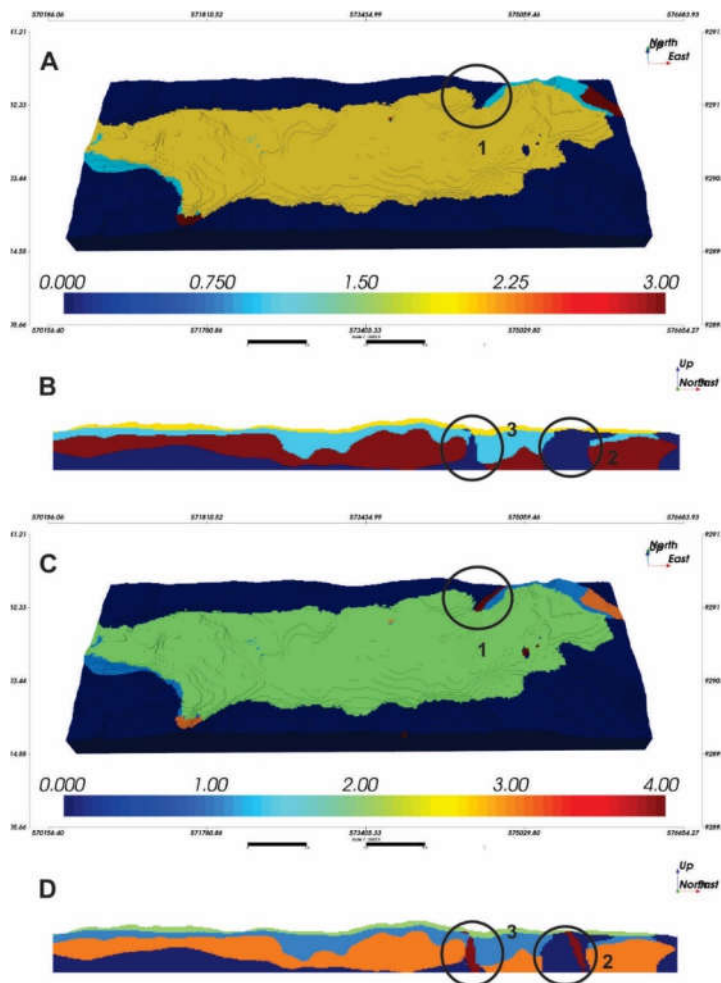


Figura 4-64: A figura exibe modelos construídos a partir de diferentes regras. Modelo e seção construídos ao considerar os estêreis e intrusivas como categoria 0 em A e B, e modelo e seção obtidos ao classificar os estêreis e as intrusivas em categorias distintas é apresentado em C e D. Note a falha preenchida por intrusivas presente nas regiões demarcadas 1, 2 e 3 no modelo classificado separadamente e a incorporação da intrusiva aos estêreis no modelo classificado em conjunto. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias. Nas imagens A e B a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estêreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos. Nas imagens C e D a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estêreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor verde a categoria 2 da canga superficial, a cor laranja a categoria 3 dos jaspelitos e a cor vermelha representa a falha preenchida por intrusivas.

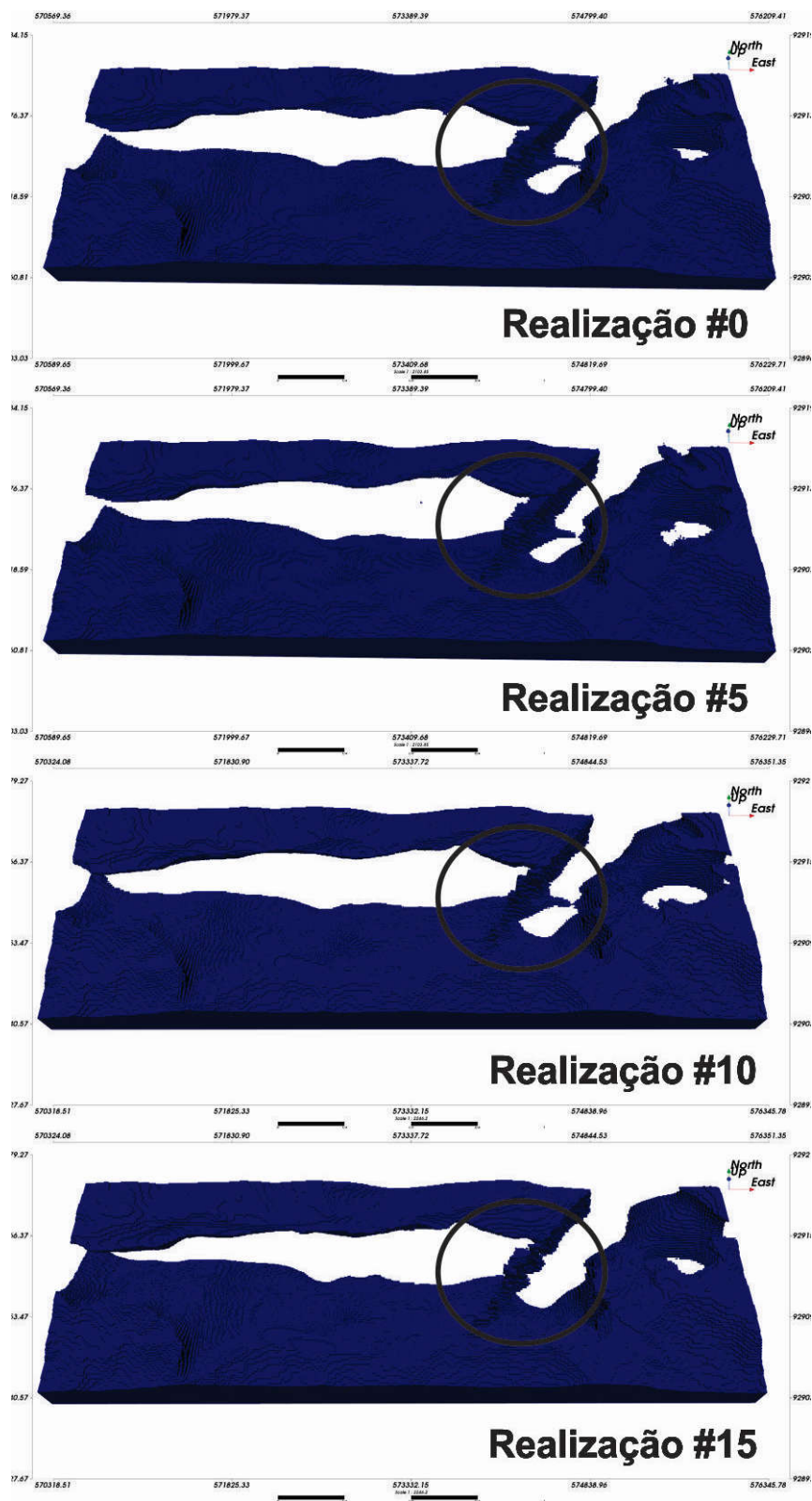


Figura 4-65: A imagem apresenta as realizações 4, 66, 79 e 82 da categoria 0 dos estêreis na cor azul. Note a presença da falha preenchida por intrusivas na região demarcada pelo círculo e a variabilidade desta região.



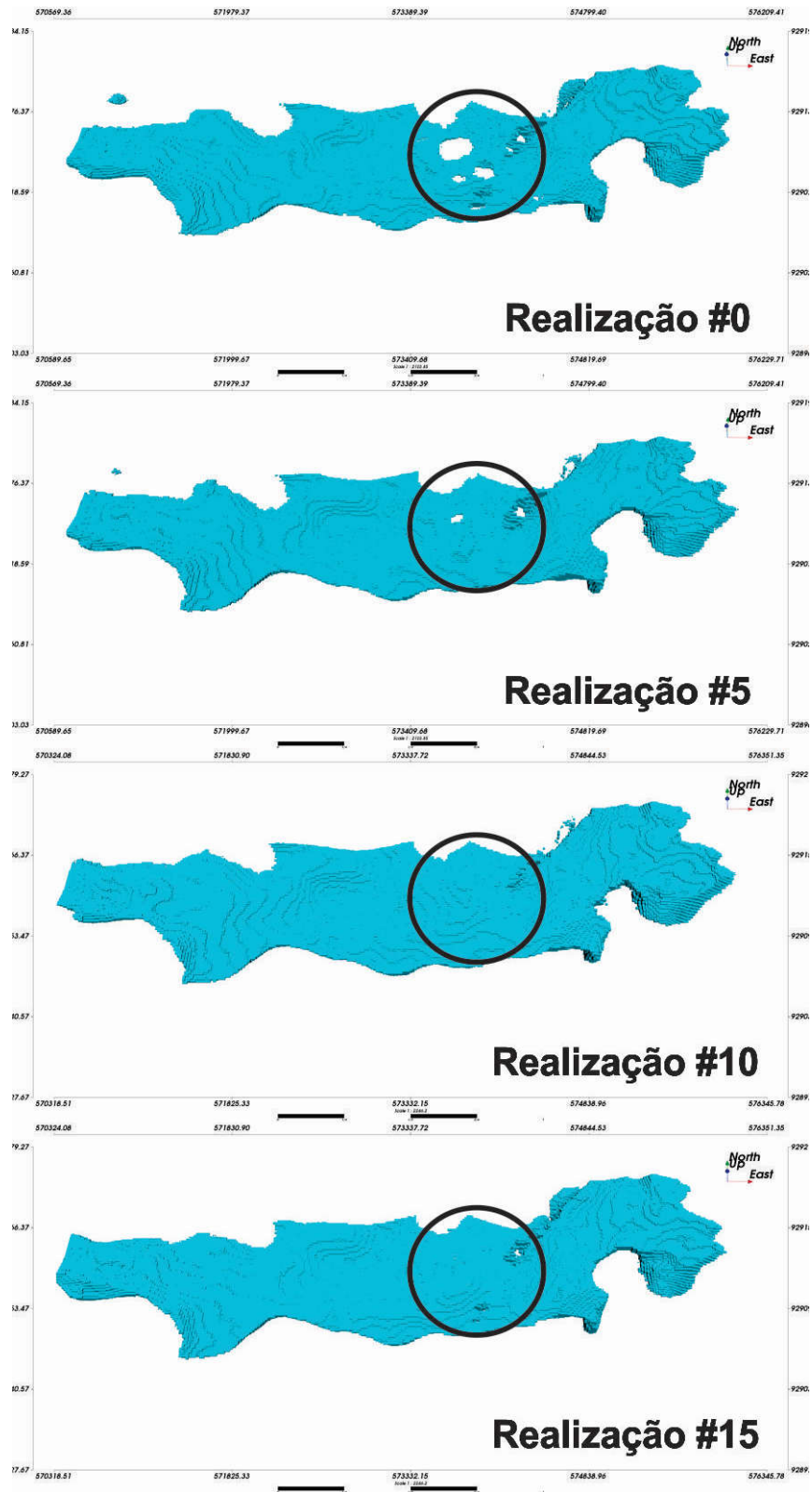


Figura 4-66: A imagem apresenta as realizações 4, 66,79 e 82 da categoria 1 da hematita em azul claro. A região do círculo demonstra a variabilidade entre modelos obtida na simulação.

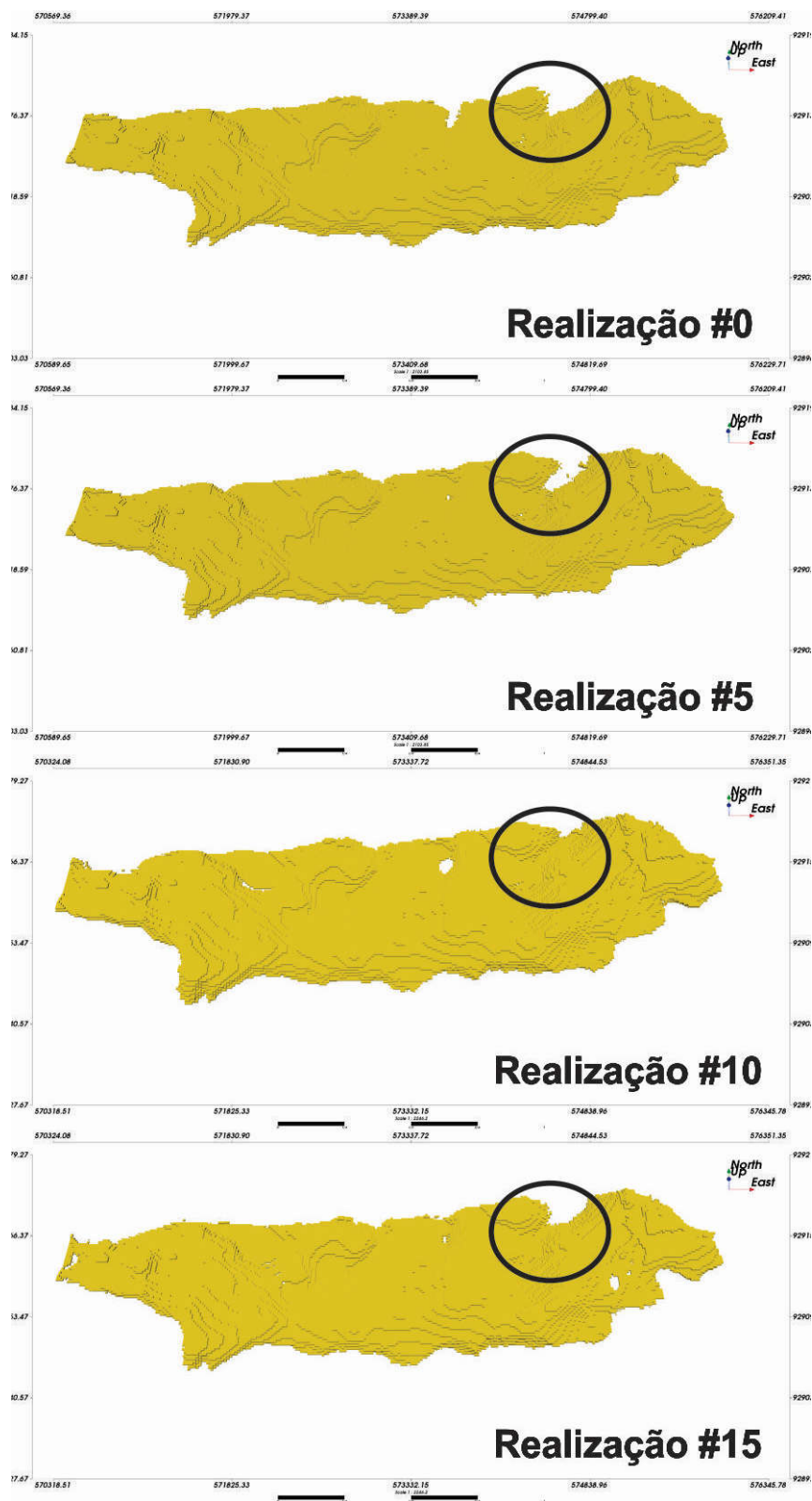


Figura 4-67: A imagem apresenta quatro realizações da categoria 2 da canga superficial em amarelo. A região demarcada demonstra a variabilidade entre modelos obtida na simulação.

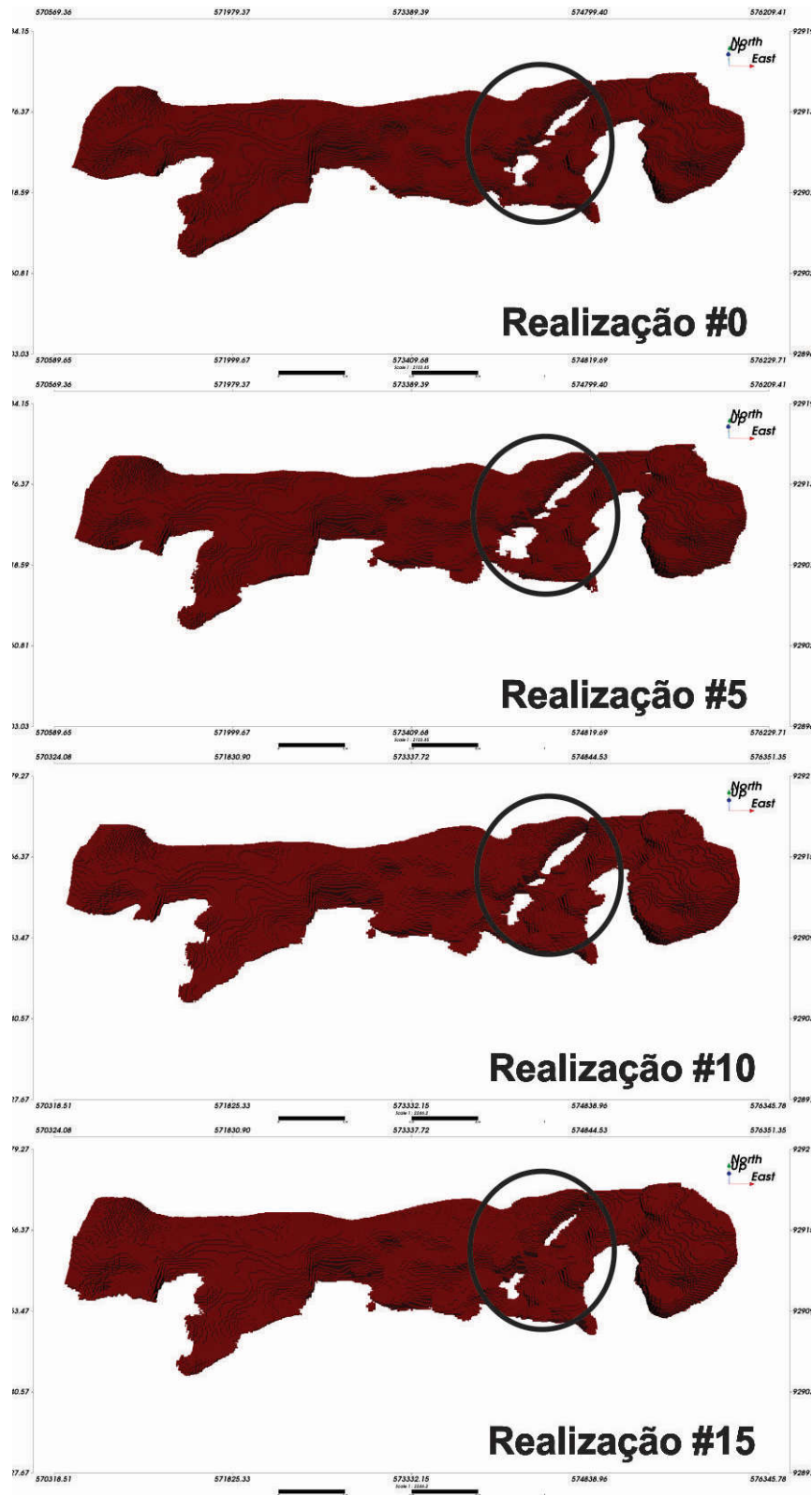


Figura 4-68: A imagem apresenta as realizações 0,5,10 e15 da categoria 3 dos jaspelitos na cor vermelha. Na região demarcada, fica evidente a variabilidade entre realizações obtida na simulação. Note, na região demarcada, da ausência de blocos de jaspelitos devido a presença da intrusiva dos estéreis.



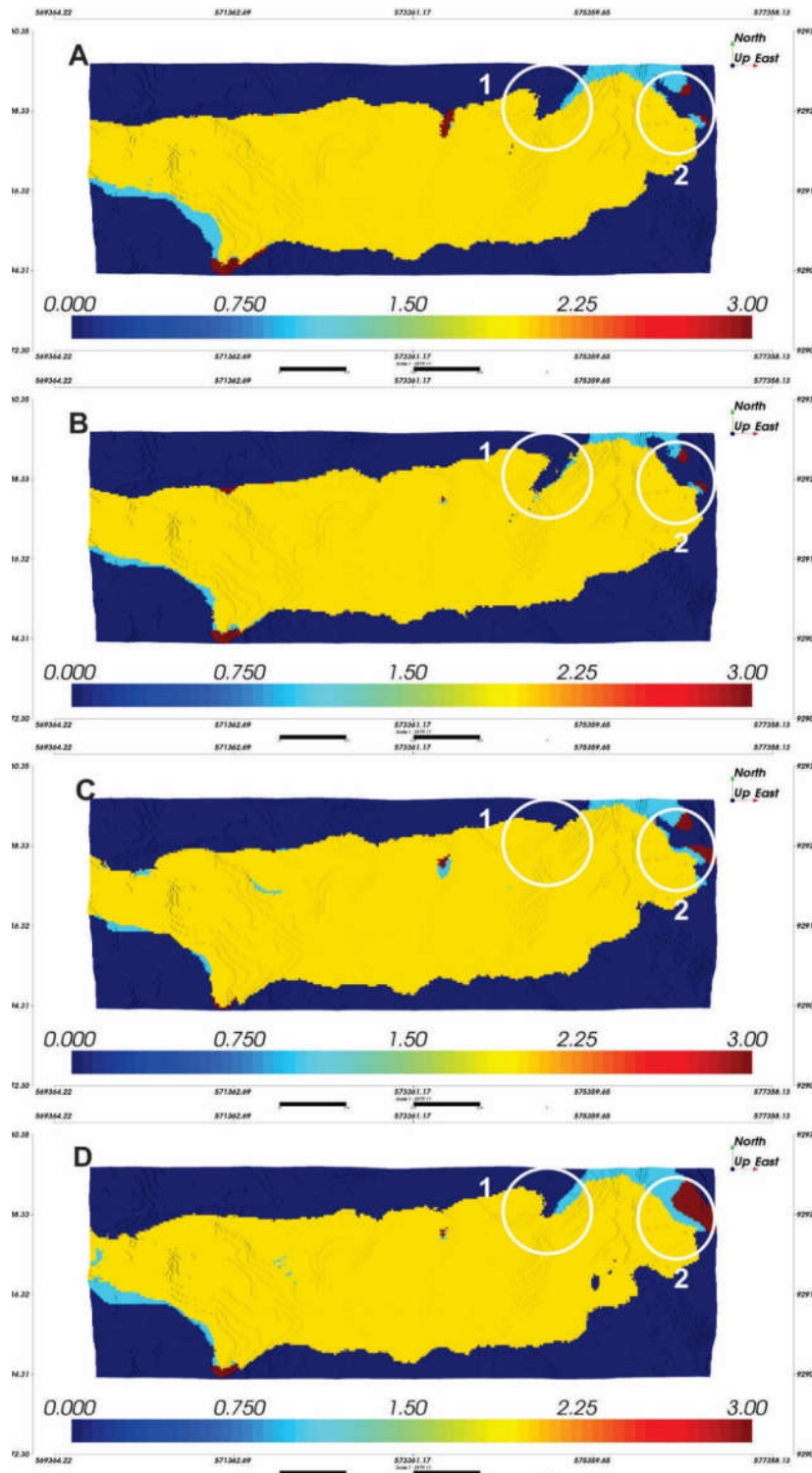


Figura 4-69: A imagem apresenta as realizações 4, 66, 79 e 82 para o modelo geológico final. Note a variabilidade apresentada em 1 obtida pela simulação independente da região da falha. A região demarcada em 2 demonstra a variabilidade da hematita e do jaspelitos entre realizações. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

#### 4.5.5 Pós-processamento e validações

As realizações do modelo geológico construídas pelo método hierárquico apresentaram estruturas consistentes e realísticas para os domínios geológicos de cada categoria. Os resultados obtidos na construção do modelo final foram confrontados contra as amostras de furos de sondagem e as seções geológicas para verificar se as realizações obtidas honram os dados. Na Figura 4-70, é apresentada a realização 82 que demonstra que os dados são respeitados nos modelos gerados, a partir de três seções leste-oeste e duas seções norte-sul nas quais são confrontados os dados e a realização 82.

Note nas seções 60, 120 e 180 em Y os locais marcados pelos círculos que demonstram que os dados foram honrados durante a simulação. Na região 1 demonstra que os dados provenientes de furos de sondagem e que os novos dados de intrusivas foram respeitados na simulação. A região demarcada 2 confirma que os dados provenientes de seções geológicas acrescentadas ao banco de dados coincidem com a categoria dos blocos para o mesmo local. Note em 3 que os dados de seções geológicas adicionados ao banco de dados foram respeitados na realização apresentada. Considerando as seções 100 e 300 em X os locais marcados em 5 confirmam que os dados provenientes de furos de sondagem são concordantes com as realizações. Os dados em 4 demonstram que os blocos centros de cada bloco da seção da realização coincidem com os dados das seções geológicas adicionadas ao banco de dados.

As 100 realizações construídas pelo método foram validadas, comparando as distribuições de cada categoria das realizações com as distribuições do modelo de referência Lito4. As primeiras 50 realizações e o modelo de referência são apresentadas na Figura 4-71, onde fica evidente as flutuações das proporções de cada categoria entre realizações. A Figura 4-72 exhibe as realizações restantes comparadas ao modelo Lito4, que também exibem as flutuações das diferenças das proporções de cada categoria entre realizações. Ao comparar as realizações fica evidente que as proporções de cada categoria tendem a se igualar as proporções apresentadas no modelo de referência Lito4.

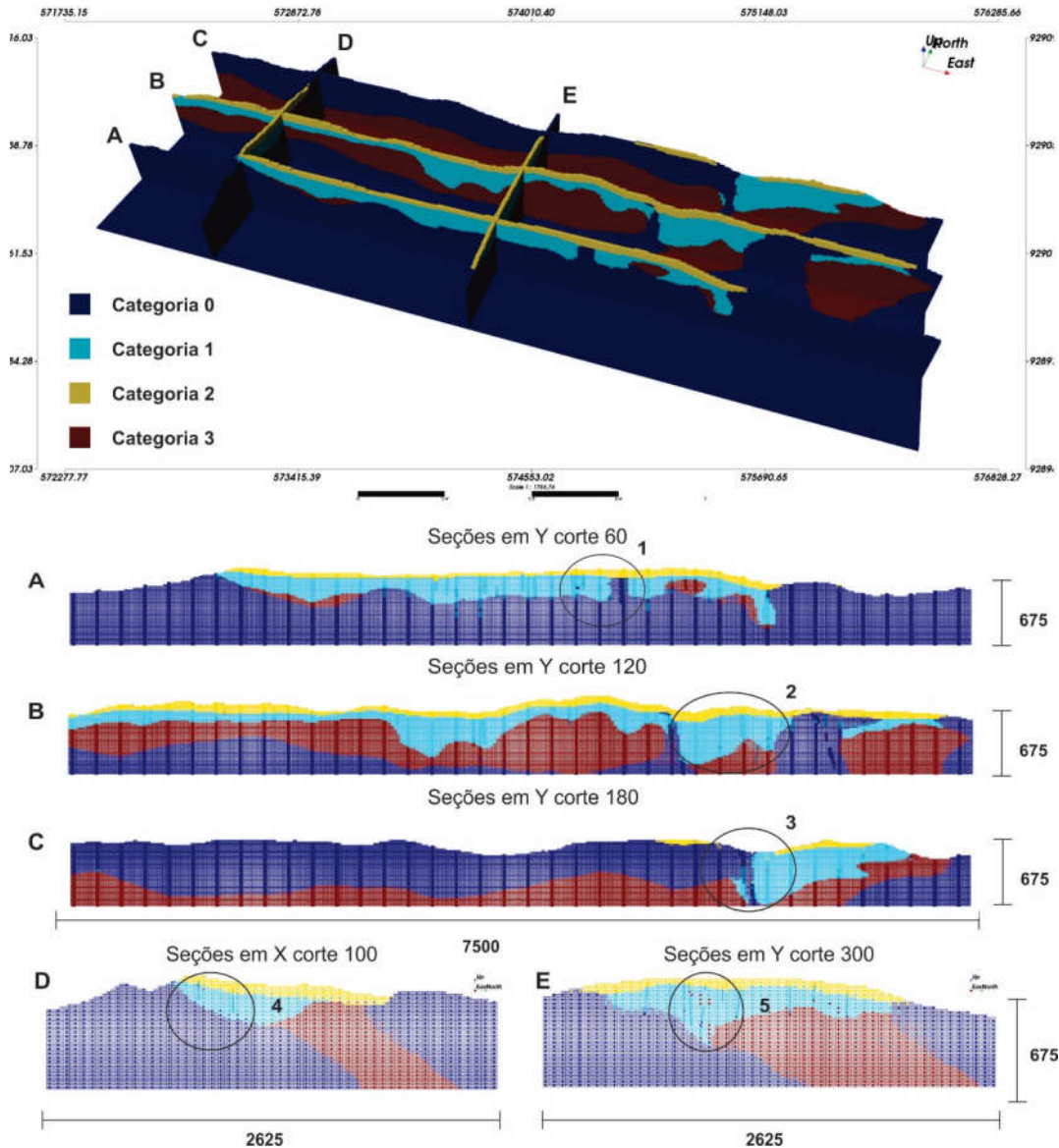


Figura 4-70: A figura apresenta as seções verticais da realização 82 evidenciando que os dados foram honrados na simulação. Da direita para a esquerda nas seções leste-oeste de A a C, e nas seções norte-sul em D e E. Note, nas regiões demarcadas 1, que os dados provenientes de furos de sondagem foram honrados durante a simulação. A região demarcada 2 demonstra que os dados provenientes de seções geológicas acrescentadas ao banco de dados foram respeitados. A região 3 mostra, que na realização apresentada, os dados de intrusivas foram honrados. Nas regiões 4 e 5, os centroides de cada bloco coincidem com os dados provenientes de seções geológicas e os dados de furos de sondagem foram respeitados. Nas imagens, a escala de cores está associada a distinção de categorias, de modo que a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estéreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

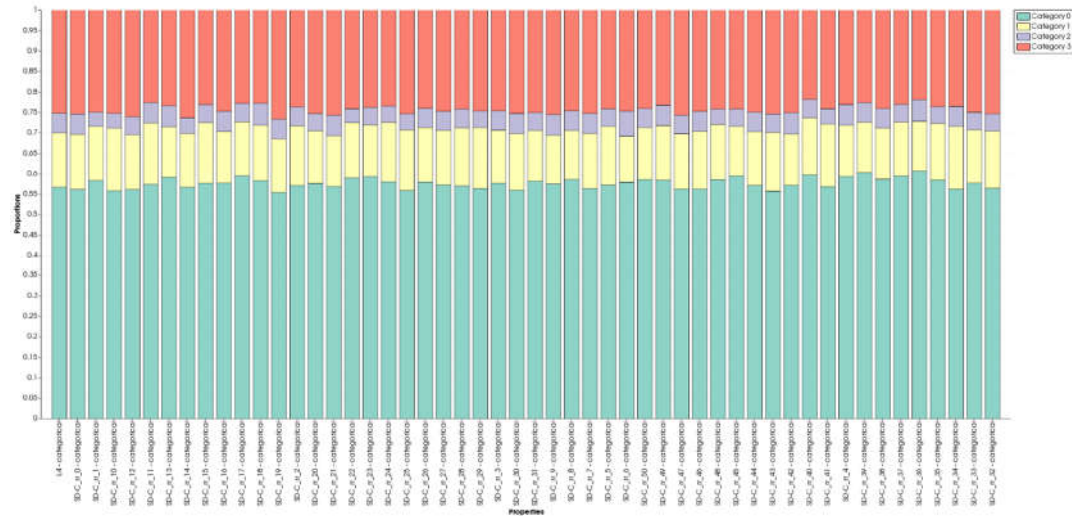


Figura 4-71: A figura exibe a proporção das primeiras 50 realizações obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência. Na imagem, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estêreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

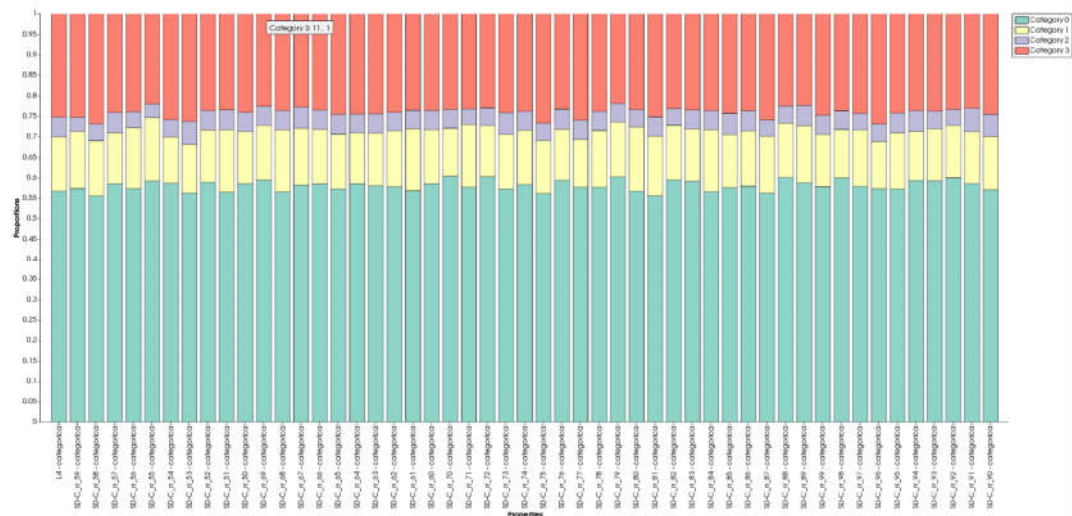


Figura 4-72: A figura exibe a proporção das 50 realizações restantes obtidas com a simulação e a proporção do modelo de referência. Na imagem, a cor verde escura representa a categoria 0 dos estêreis, a cor amarela a categoria 1 da hematita, a cor roxa a categoria 2 da canga superficial e cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

Como discutido anteriormente, a variabilidade volumétrica obtida na simulação pode ser avaliada ao comparar as diferentes litologias através do gráfico apresentado na Figura 4-73, no qual a coluna de número um representa os estêreis, a de número dois a hematita, a de número três a canga e a de número quatro o jaspelito. Desta forma, é possível comparar os domínios obtidos em cada realização e o modelo referencial Lito4 em amarelo. No gráfico, as categorias 0 e 3 apresentam variabilidade relativamente pequena de 11,8% e 23,4%, entretanto a hematita e a canga apresentaram maior variabilidade de 57,7% e 49,6%, respectivamente.

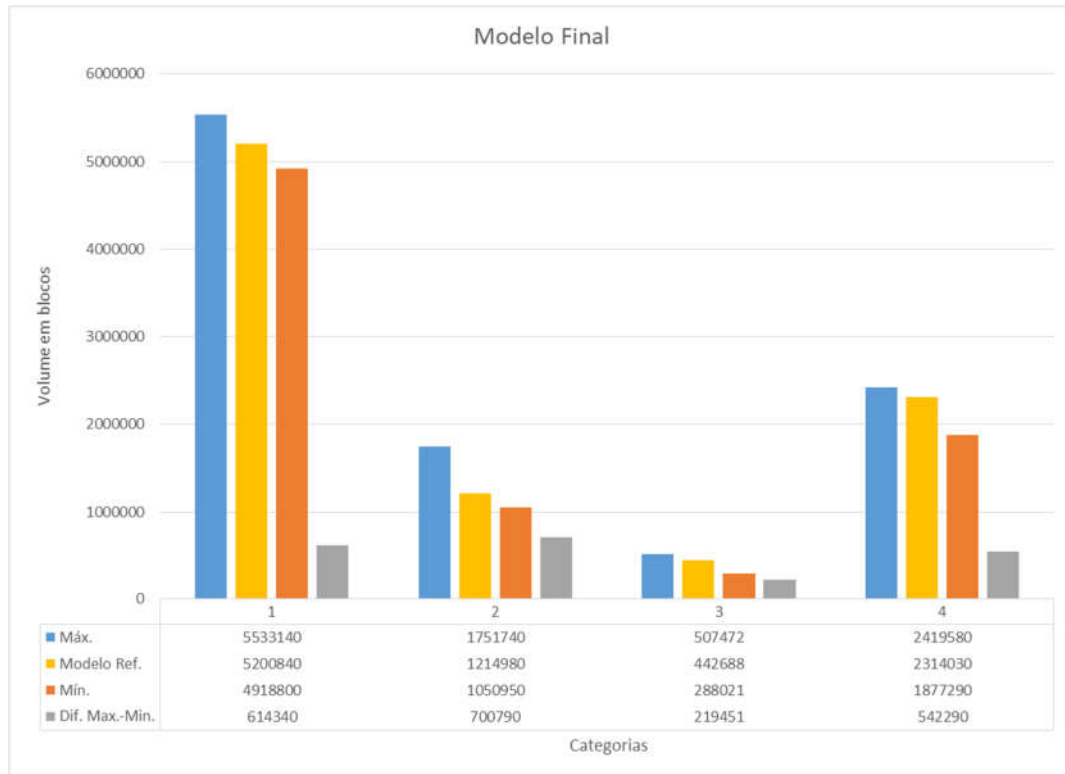


Figura 4-73: O gráfico da imagem apresenta a variabilidade obtida a partir da diferença do maior e do menor volume dos domínios obtidos para cada categoria pelo método final. No gráfico, os estéreis são representados em 1, a hematita em 2, a canga superficial em 3 e os jaspelitos em 4.

A partir das 100 realizações construídas para os modelos geológicos, é possível obter mapas de probabilidade, os quais identificam a probabilidade de um dado local pertencer ou não a determinado domínio geológico. A Figura 4-74 apresenta os mapas de probabilidade para cada categoria variando de 0% em azul a 100% em vermelho de chance de ocorrência. O modelo apresentado em A representa a categoria 0 do estéril, em B é apresentado o modelo de probabilidade para a hematita, em C o modelo de probabilidade para a canga superficial e o último modelo em D representa a categoria 3 dos jaspelitos. As regiões de incerteza são marcadas pela transição de cores e de probabilidades de ocorrência.

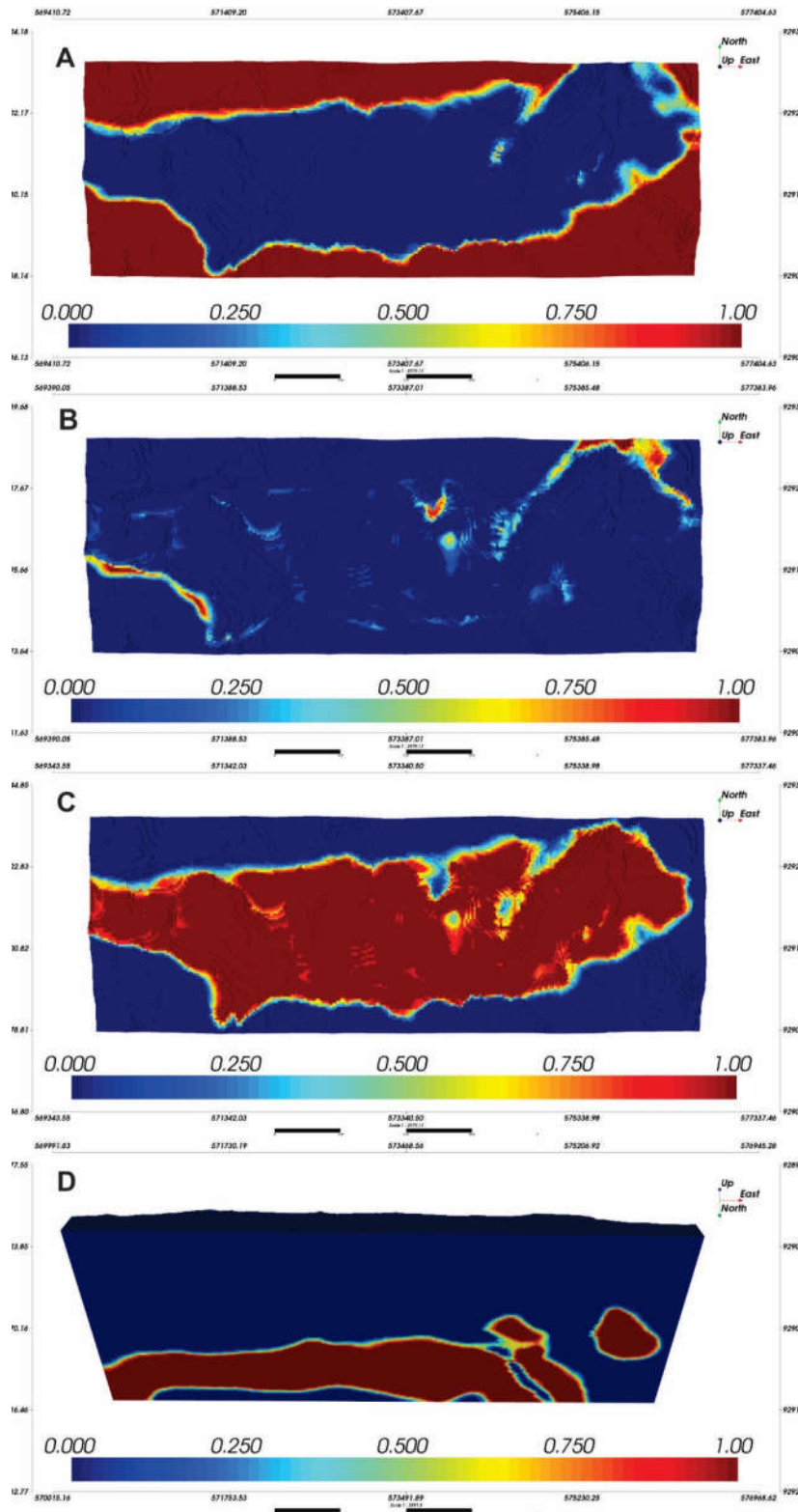


Figura 4-74: A figura exibe os modelos de probabilidade de cada categoria das realizações obtidas na simulação. Em A, o modelo dos estéreis, em B o modelo da hematita, em C o modelo da canga e em D o modelo do jaspelito. A escala de cores está associada a probabilidade de ocorrência de uma determinada categoria, variando de 0% em azul a 100% em vermelho de probabilidade de ocorrência.

As figuras apresentadas a seguir possuem seções geológicas do modelo de referência Lito4 e da realização 82 dos modelos obtidos pelo método proposto. Essas seções permitem contrapor os modelos e verificar se a realização selecionada apresenta sentido do ponto de vista geológico, ou seja, se as realizações geradas na simulação apresentam estruturas realistas. Nas figuras, são apresentadas seções em Y no corte 60, 120 e 180 e seções em X nos cortes 100 e 300.

Na região esquerda da Figura 4-75, são apresentadas as seções em Y do modelo de referência e na região direita as seções em Y da realização 82. A falha preenchida por intrusivas presente no modelo de referência e ausente nos modelos implícitos anteriores, é reproduzida no modelo final. Entretanto, ocorre uma pequena supervalorização na espessura da falha quando comparada ao modelo de referência, como representado em 2. A metodologia utiliza da krigagem como método de interpolação das distâncias assinaladas, conseqüentemente pequenas estruturas presentes no modelo de referência em 1, como intrusivas de pequeno porte e lentes de jaspelito, podem não ser representadas no modelo final devido ao efeito de suavização da krigagem. Contudo, a metodologia empregada compensa as proporções ausentes das pequenas estruturas ao aumentar o volume dos corpos contínuos da mesma categoria (em 3), apesar de não construir lentes como o esperado.

A Figura 4-76 exhibe as seções em X do modelo de referência na região esquerda, as seções em X da realização 82 na região direita. Nas seções, poucos blocos estão discordantes entre o modelo de referência e a realização 82, o método reproduziu em 1 as principais estruturas interpretadas pelo especialista em modelos geológicos. Assim como demonstrado anteriormente, as pequenas intrusivas presentes em 2 e 3 no modelo Lito4 não são reproduzidas na realização 82 devido a suavização. Outra justificativa consiste na falta de informação disponibilizada para o algoritmo. Estruturas construídas explicitamente permitem adicionar ao modelo determinístico a interpretação do especialista em modelos geológicos. Essa informação não é disponibilizada para a aplicação do método implícito, o que impossibilita a reprodução destas estruturas.

Apesar da dificuldade em reproduzir pequenas estruturas, o método permite construir realizações para o modelo geológico que apresentam feições realistas e concordantes com o modelo de referência. Desta forma, é possível afirmar que a metodologia proposta gerou modelos realistas que permitem acessar a incerteza dos domínios modelados.



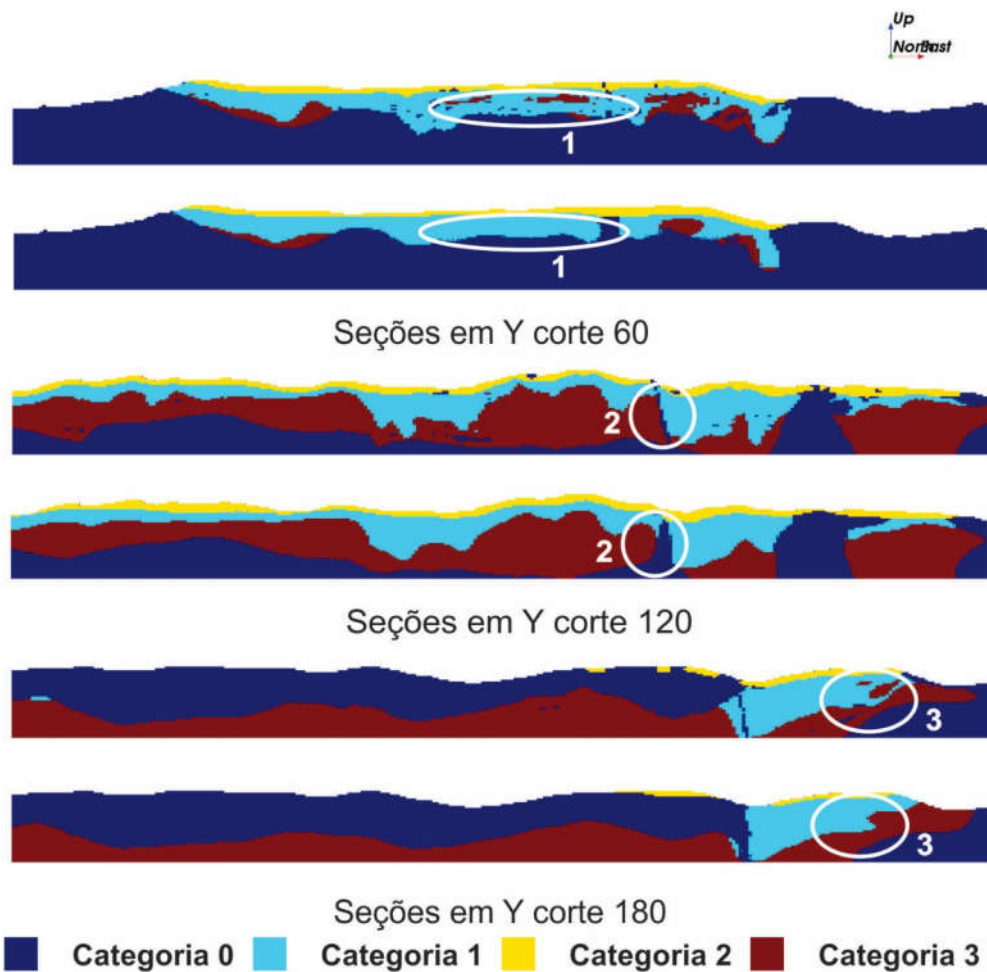


Figura 4-75: A imagem apresenta a comparação entre seções em Y. Para cada corte, a seção superior representa modelo de referência Lito4 e a seção inferior os cortes da realização 82. Nas seções, a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estêreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.

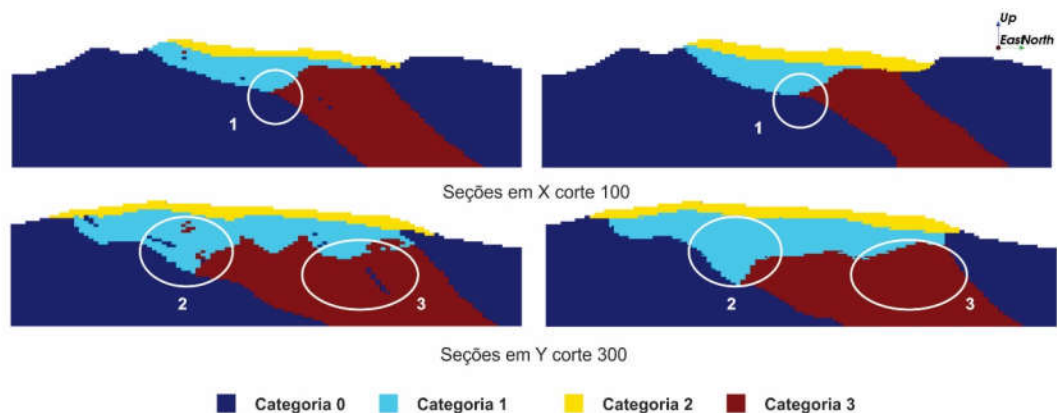


Figura 4-76: A imagem apresenta a comparação entre seções em X. Na região esquerda, são apresentados os cortes do modelo de referência Lito4 e na esquerda os cortes da realização 82. Nas seções, a cor azul escuro representa a categoria 0 dos estêreis, a cor azul claro a categoria 1 da hematita, a cor amarela a categoria 2 da canga superficial e a cor vermelha a categoria 3 dos jaspelitos.



## 4.6 Discussões

Os três métodos utilizados para acessar a incerteza do modelo geológico obtiveram resultados satisfatórios. Os métodos testados se mostraram alternativas válidas para a modelagem de depósitos minerais. Cada método apresenta vantagens distintas quando aplicado para diferentes etapas do empreendimento mineiro.

O método da geoestatística multipontos permite incorporar a interpretação e experiência do especialista em modelos geológicos ao construir modelos teóricos usados como imagem de treinamento. Contudo, a construção da imagem de treinamento demanda uma grande quantidade de informação e um grande esforço computacional, o que normalmente não é o que procura o especialista em modelos geológicos. Desta forma, a utilização deste método é indicada para situações onde existe uma grande quantidade de informações sobre o depósito para condicionar adequadamente as simulações.

Os métodos implícitos são indicados para todas as fases do empreendimento mineral, em especial para as fases iniciais nas quais não há muita informação sobre o depósito. A construção de modelos por métodos implícitos permite reduzir o tempo de trabalho e a subjetividade do modelo geológico ao reproduzir o modelo a partir dos mesmos parâmetros iniciais. Além disso, como demonstrado pelos estudos de caso, permite avaliar a incerteza do modelo através construção de múltiplos cenários para os contatos geológicos.

A incorporação da informação geológica nos modelos implícitos é expressiva no cálculo da função distância e no estudo da continuidade espacial dos dados que representam cada domínio. A utilização da krigagem como interpolador permite obter limites suaves entre litologias, mas gera o efeito indesejado da suavização, que pode comprometer a reprodução de pequenas estruturas.

Ao adicionar mais informação ao conjunto de dados ocorre uma melhora significativa na qualidade dos modelos gerados. A metodologia do parâmetro C apresenta um ganho considerável na reprodução das estruturas e proporções das categorias, quando comparada as demais metodologias apresentadas.

A utilização de métodos automáticos ou semi-automáticos não permite substituir completamente o especialista experiente, entretanto a sua utilização pode auxiliar na redução do tempo necessário para a construção do modelo geológico e permitir quantificar a incerteza associada ao modelo. Considerando a aplicabilidade dos métodos propostos, a seguir são apresentados as principais vantagens e desvantagens encontradas para cada metodologia:

### 4.6.1 *Contactsim* (MPS)

Vantagens:

- Possibilita utilizar de modelos conceituais como imagem de treinamento em fases preliminares do empreendimento mineral.

- Permite reproduzir pequenas e grandes estruturas da imagem de treinamento.
- Permite a reprodução de padrões geométricos complexos.
- Permite quantificar a incerteza espacial de modo realista ao reproduzir os padrões geométricos da imagem de treinamento.
- Zonas de incerteza podem ser delimitadas para facilitar o processo de simulação e diminuir o esforço computacional.

#### Desvantagens:

- O método necessita da utilização de uma imagem de treinamento construída a partir dos dados coletados. A construção dessa imagem de treinamento pode demandar muito esforço e da disponibilidade de uma grande quantidade informações, o que as vezes não é possível no empreendimento mineral.
- Para aplicar o método, é necessário um grande esforço computacional. Na construção e utilização da árvore de busca, é necessária uma grande quantidade de memória RAM, desta forma nos modelos construídos pelo método foi necessário cinco vezes mais memória RAM quando comparado aos demais métodos.
- Ao reproduzir pequenas estruturas da imagem de treinamento, o método pode gerar blocos isolados e dispersos, que se distanciam de uma estrutura geológica real.

#### 4.6.2 SD Sim

##### Vantagens:

- Os modelos podem ser atualizados com facilidade e rapidez ao adquirir novos dados. Não é necessário construir um modelo digitalizado manualmente a partir de novas informações.
- A reprodução do modelo a partir dos mesmos parâmetros é exata, o que facilita um processo de checagem.
- Permite a construção de zonas de incerteza nas quais são realizadas a simulações, o que diminui o esforço computacional.
- As informações geológicas são incorporadas ao modelo pelo cálculo das distâncias assinaladas e as direções de maior continuidade e o efeito pepita.

- A incerteza associada ao modelo geológico pode ser acessada ao simular as distâncias assinaladas.

Desvantagens:

- A simulação das distâncias assinaladas pode não reproduzir estruturas de pequena escala.
- A simulação das distâncias é muito sensível aos parâmetros estabelecidos, o que leva em alguns casos à modelos pouco realistas, muito suavizados ou com a presença excessiva de texturas *salt and pepper*.
- Os diferentes domínios que representam litologias distintas são simulados com o mesmo raio de busca, o que impossibilita utilizar do conhecimento do especialista que poderia levar a melhores resultados.
- A não estacionalidade do variograma das funções distâncias torna a análise da continuidade espacial arbitrária.

#### 4.6.3 SD –C

Vantagens:

- Os modelos podem ser atualizados com facilidade e rapidez ao adquirir novos dados.
- Usando os mesmos parâmetros, os modelos são reproduzidos com exatidão.
- A simulação é realizada apenas na zona de incerteza e não condicional, o que diminui a demanda computacional e o tempo de processamento.
- As informações geológicas são incorporadas ao modelo pelo cálculo das distâncias assinaladas e as direções de maior continuidade e o efeito pepita.
- Permite adicionar o conhecimento do especialista ao trabalhar cada domínio de modo independente.
- Permite a construção de zonas de incerteza nas quais são realizadas a simulações, o que diminui o esforço computacional.
- A incerteza associada ao modelo geológico pode ser acessada ao simular as distâncias assinaladas na zona de incerteza construída a partir do parâmetro C.

Desvantagens:

- A seleção das regras para a hierarquia dos contatos depende da experiência do especialista em modelos geológicos.
- Dificuldade ao determinar o valor do parâmetro C que represente toda a variabilidade.
- O método é muito dependente da fase de interpolação.
- O algoritmo é baseado em krigagem ordinária, então apenas estruturas lineares são modeladas.
- O efeito da suavização gerado pela krigagem pode comprometer a reprodução de pequenas estruturas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa dissertação propôs como meta avaliar os métodos de modelagem implícita estocástica que possam ser usados para determinar a incerteza dos contatos entre domínios geológicos. Com essa finalidade, foram apresentados sete objetivos específicos: desenvolver uma metodologia para definir a incerteza dos contatos geológicos, gerar zonas de incertezas e contatos, analisar a sensibilidade dos tamanhos das zonas de incerteza, obter diversas realizações equiprováveis para os contatos litológicos, avaliar a incerteza geológica em relação a geometria e posição dos contatos em diferentes litologias, avaliar as metodologias propostas em um banco de dados real e avaliar a incerteza volumétrica dos contatos a partir da diferença entre limites dos domínios geológicos, para cada metodologia utilizada.

A metodologia SD-C, que utiliza o parâmetro C para modificar a função distância, foi operacionalizada em um plug-in do software de código aberto SGeMS para cumprir o primeiro objetivo. Esta metodologia permite acessar a incerteza dos contatos entre domínios ao construir múltiplos contatos dentro da zona de incerteza estabelecida pelo parâmetro C. Além disso, como a simulação é realizada apenas na região de incerteza e de modo não-condicional, o esforço computacional é reduzido drasticamente.

Três metodologias foram apresentadas com o objetivo de avaliar a incerteza dos contatos geológicos. Em todas elas são selecionadas regiões de maior probabilidade de ocorrência dos limites entre domínios, e construídas as múltiplas realizações dos contatos nestas regiões. A incerteza do modelo está concentrada na região de incerteza onde ocorre a transição entre litologias, portanto os métodos apresentados permitiram acessar a incerteza ao gerar diversas realizações dos contatos geológicos.

Os estudos de caso apresentados no capítulo 4 permitiram aplicar as diferentes metodologias em um banco de dados real proveniente de um depósito de ferro. Os resultados obtidos foram satisfatórios para todas as metodologias. Diferentes tamanhos para as zonas de incerteza foram testados durante a construção dos modelos, e os melhores resultados apresentados para cada método apresentados no capítulo. As metodologias foram comparadas considerando a reprodução das estruturas geológicas e proporções das categorias do modelo de referência Lito4.

O método que utiliza do parâmetro C para modificar a função distância foi selecionado para a construção do modelo final devido a semelhança das suas realizações com as proporções do modelo de referência e sua capacidade de reproduzir as grandes estruturas do modelo de forma satisfatória. Além disso, o método permite avaliar e modelar os contatos entre litologias de modo independente, e incorporar experiência do especialista em modelos geológicos. Vale ressaltar, que as principais desvantagens na aplicação do método estão na determinação das regras para a hierarquia dos contatos e a difícil escolha do parâmetro C para cada grupo.

A metodologia de geoestatística multipontos permite reproduzir de modo satisfatório as estruturas presentes no modelo de referência e construir múltiplas

realizações para os contatos geológicos o que permite avaliar a incerteza do modelo. Entretanto, para aplicar o método é necessário a construção prévia da imagem de treinamento o que muitas vezes se torna laborioso para especialista em modelos geológicos. Para a construção das múltiplas realizações, é necessário um grande esforço computacional para aplicar a metodologia, o que pode dificultar a utilização do método.

A simulação das função distância é uma metodologia simples e rápida que permite a reprodução e atualização dos modelos com facilidade. Contudo, a simulação das distâncias na zona de incerteza é muito sensível aos parâmetros selecionados, e por isso apresenta grande impacto nas realizações obtidas, ao gerar estruturas pouco realistas como modelos muito suavizados ou a presença de blocos isolados e dispersos.

Os métodos implícitos apresentados utilizam a krigagem ordinária como interpolador da função distância para obter transições suaves entre litologias, mas esta característica pode impactar na reprodução das pequenas estruturas do modelo, devido ao efeito da suavização.

A etapa de construção do modelo geológico é crucial na avaliação de depósitos minerais, uma vez que estimativas e simulações de teores são realizadas nos domínios preestabelecidos. A incerteza na determinação dos limites entre domínios geológicos em subsuperfície, impacta na quantidade e qualidade do bem mineral de interesse, bem como a sua localização. Desta forma, esta incerteza deve ser avaliada e este trabalho apresentou três metodologias que permitem acessar essa incerteza de modo satisfatório.

## 5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Existem diversas fontes de incerteza associadas ao empreendimento mineral, entretanto este trabalho esteve direcionado a um tipo específico de incerteza, a incerteza relacionada aos limites entre domínios geológicos. Existem ainda questões relacionadas ao tema que não foram abordadas neste trabalho e que merecem o devido estudo e análise:

- Estudar a possibilidade de integrar informações secundárias, provenientes de interpretação do especialista em modelos geológicos.
  - Integrar informações de mergulho e inclinação de camadas obtidas a partir de medições de campo ou interpretação geológica.
  - Implementar metodologia automática para definir o parâmetro C para duas ou mais categorias.
    - Estudar alternativas para a hierarquização de categorias.
    - Implementar o plug-in de hierarquização de modelos binários.
    - Investigar outras técnicas de interpolação das distâncias assinaladas, para avaliar o efeito na reprodução de pequenas estruturas.
  - Investigar a construção de modelos híbridos implícitos e explícitos para a incorporação de pequenas estruturas.

- Aplicar a metodologia do *contactsim* utilizando o banco de dados com a presença de seções geológicas.
- Comparar as metodologias das distâncias assinaladas e a utilização da krigagem dos indicadores em uma zona de incerteza.
- Aplicar as três metodologias a uma zona de incerteza com o mesmo tamanho.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAMSEN, P.; FJELLVOLL, B.; AND HAUGE, R., 2008. *Process based on stochastic modeling of deep marine reservoirs*. In EAGE Petroleum Geostatistics 2007.

ARPAT, G. B., 2004. *SIMPAT: stochastic simulation with patterns*. In: 17th SCRF Meeting, Stanford Center for Reservoir Forecasting, Stanford University.

BLOOMENTHAL, J.; WYVILL, B.; AND BAJAJ, C. 1997. *Introduction to implicit surfaces*. Morgan Kaufmann.

BOUCHER, A., 2009. *Considering complex training images with search tree partitioning*. Computers and geosciences, 35: 1151-1158.

BOUCHER, A.; COSTA, J. F.; RASERA, L. G.; AND MOTTA, E., 2004. *Simulation of geological contacts from interpreted geological model using multiple-point statistics*. Mathematical Geosciences, 46(5), 561-572.

CÁCERES, A.; EMERY, X.; AEDO, L.; AND GÁLVEZ, O., 2011. *Stochastic geological modeling using implicit boundary simulation*. In Proceedings of the 2nd International Seminar on Geology for the Mining Industry GEOMIN. p. 21.

CAERS, J., 2011. *Modeling uncertainty in the earth sciences*. John Wiley & Sons.

CALCAGNO, P.; CHILÈS, J. P.; COURRIOUX, AND G.; GUILLEN, A., 2008. *Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 171(1-4), 147-157.

CHILÈS, J. P.; AUG, C.; GUILLEN, A.; AND LEES, T., 2004. *Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data: the potential-field method*. In Proceedings of international symposium on orebody modelling and strategic mine planning, Perth, Australia (pp. 313-320).

CHILES, J. P.; DELFINER, P., 1999. *GEOSTATISTICS: modeling spatial uncertainty*. Wiley series in probability and statistics. Applied probability and statistics section, New York, Wiley, 695p.

COWAN, E. J.; BEATSON, R. K.; FRIGHT, W. R.; MCLENNAN, T. J.; AND MITCHELL, T. J., 2002. *Rapid geological modelling*. In Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining, International Symposium (pp. 23-25).



COWAN, E.J.; BEATSON, R.K.; ROSS, H.J.; FRIGHT, W.R.; MCLENNAN, T.J.; EVANS, T.R.; CARR, J.C.; LANE, R.G.; BRIGHT, D.V.; GILLMAN, A.J.; AND OSHUST, P.A.; TITLEY, M., 2003. *Practical implicit geological modeling*. S. Dominy (Ed.), Fifth International Mining Geology Conference Proceedings, AusIMM Publication Series No 8/2003, pp 89–99.

DEUTSCH, C. V.; XIE, Y.; AND CULLICK, A. S., 2001. *Surface geometry and trend modeling for integration of stratigraphic data in reservoir models*. In 2001 Society of Petroleum Engineers Western Regional Meeting, number SPE Paper 6881, Bakersfield, California, March 2001. British Society of Reservoir Geologists.

DEUTSCH, C.; AND JOURNEL, A., 1998. *Geostatistical software library and user's guide (gslib)*. Oxford University Press Oxford.

DIMITRAKOPOULOS, R.; MUSTAPHA, H.; AND GLOAGUEN, E., 2010. *High-order statistics of spatial random fields: exploring spatial cumulants for modeling complex non-Gaussian and non-linear phenomena*. *Mathematical Geosciences*, v. 42, n. 1, p. 65.

GOOVAERTS, P., 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press on Demand.

GUARDIANO, F. B.; AND SRIVASTAVA, R. M., 1993. *Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments*. In: *Geostatistics Troia'92*. Springer, p. 133–144.

HARDING, A.; STREBELLE, S.; LEVY, M.; THORNE, J.; XIE, D.; LEIGH, S.; AND SCAMMAN, R., 2005. *Reservoir facies modelling: new advances in MPS*. In *Geostatistics Banff 2004* (pp. 559-568). Springer, Dordrecht.

HONARKHAH, M.; AND CAERS, J., 2010. *Stochastic simulation of patterns using distance-based pattern modeling*. *Mathematical Geosciences*, 42: 487-517.

HOSSEINI, A.H., AND DEUTSCH, C.V. (2007). *A Distance Function Based Algorithm to Quantify Uncertainty in Areal Limits*. Centre for Computational Geostatistics Annual Report 9, Paper 127.

HOULDING, S. W., 1994. *3D geoscience modelling*. Computer techniques for geological characterization.

JOURNEL, A. G., 1989. *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*, Vol. 8 of Short Course in Geology, American Geophysical Union, Washington DC, 40 pp. In: 28th International Geological Congress, Washington DC.

JOURNEL, A. G., 2002. *Combining knowledge from diverse sources: An alternative to traditional data independence hypotheses*. *Mathematical geology*, v. 34, n. 5, p. 573-596, 2002.

JOURNEL, A. G., 2004. *Beyond covariance: the advent of multiple-point geostatistics*. *Geostats Banff 2004*.

SOUZA, R. R. D., 2017. *Modelagem geológica implícita através de simulações de funções distância assinaladas*. Dissertação de Mestrado. Universidade federal do Rio Grande do Sul.

JOURNEL, A. G.; AND HUIJBREGTS, C. J., 1978. *Mining geostatistics*. Academic press.

JOURNEL, A., 1992. *Geostatistics: Roadblocks and challenges*. In Soares A. (ed.). *Geostatistics Troia 1992*. Kluwer. pp. 213-224.

KARPEKOV, T.B., AND DEUTSCH, C. V. 2016. *A Review of Boundary Modeling and One Way of Selecting the C parameter to Model Boundaries with Uncertainty*. Paper 310, CCG Annual Report 18. P. 11.

KAVOURAS, M., 1992. *A spatial information system with advanced modeling capabilities*. In: *Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems*. Springer, Dordrecht. p. 59-67.

LIU, Y.; HARDING, A.; GILBERT, R.; AND JOURNEL, A. G., 2005. *A workflow for multiple-point geostatistical simulation*. In *Geostatistics Banff 2004* (pp. 245-254). Springer, Dordrecht.

LYSTER, S. J., 2009. *Simulation of geologic phenomena using multiple-point statistics in a Gibbs sampler algorithm*. Tese de Doutorado. University of Alberta.

MALLET, J. L. L., 2002. *Geomodeling*. Oxford University Press, Inc., 2002.

MARIETHOZ, G.; AND CAERS, J., 2014. *Multiple-point geostatistics: stochastic modeling with training images*. John Wiley & Sons.

- MATHERON, G., 1963. *Principles of geostatistics*. Economic geology, 58(8), 1246-1266.
- MATHERON, G., 1973. *The intrinsic random functions and their applications*. Advances in applied probability, v. 5, n. 3, p. 439-468.
- MATHERON, G.; BEUCHER, H.; DE FOUQUET, C.; GALLI, A.; GUERILLOT, D.; AND RAVENNE, C., 1987. *Conditional simulation of the geometry of fluvio-deltaic reservoirs*. In Spe annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- MCLENNAN, J. A. 2007. *The decision of stationarity*. Tese Doutorado. University of Alberta.
- MCLENNAN, J. A.; AND DEUTSCH, C. V., 2006 *Implicit boundary modeling (boundsim)*. Centre for Computational Geostatistics, Edmonton.
- MUNROE, M. J.; AND DEUTSCH, C. V. 2008. *Full calibration of C and  $\beta$  in the framework of vein-type deposit tonnage uncertainty*. CCG Annual Report 10. 16p
- NEUFELD, C.; AND WILDE, B.J., 2005. *A Global Kriging Program for Artifact-Free Maps*. Report 7. Centre for Computational Geostatistics.
- OSHER, S.; AND FEDKIW, R., 2003. *Level set methods and dynamic implicit surfaces*. Springer-Verlag New York, Inc.
- PYRCZ, M. J.; CATUNEANU, O.; AND DEUTSCH, C. V., 2005. *Stochastic surface-based modeling of turbidite lobes*. AAPG bulletin, American Association of Petroleum Geologists, v. 89, n. 2, p. 177–191.
- PYRCZ, M. J.; AND DEUTSCH, C. V., 2014. *Geostatistical reservoir modeling*. Oxford university press.
- REMY, N.; AND BOUCHER, A; WU, J., 2009. *Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide*. Cambridge University Press, Nova Iorque, EE.UU. 264p.
- RENARD, D.; WAGNER, L.; CHILÈS, J. P.; VANN, J.; AND DERAISME, J., 2013. *Modeling the geometry of a mineral deposit domain with a Potential Field*. In 36th APCOM (pp. Modeling-the).
- ROLO, R. M. (2017). *Modelagem geológica implícita com funções distância assinaladas*. Dissertação de Mestrado. Universidade federal do Rio Grande do Sul

- ROLO, R. M.; RADTKE, R.; AND COSTA, J. F. C. L., 2017. *Signed distance function implicit geologic modeling*. REM-International Engineering Journal, 70(2), 221-229.
- ROSSI, M. E.; AND DEUTSCH, C. V., 2013. *Mineral resource estimation*. Springer Science & Business Media.
- SILVA, D. A.; AND DEUTSCH, C. V. 2012a. *Modeling Multiple Rock Types with Distance Functions: Metodology and Software*. Paper 307, CCG Annual Report 14. p. 8.
- SILVA, D. A.; AND DEUTSCH, C. V., 2012b. *Multiple point statistics with multiple training images in geostatistics*. Centre for Computational Geostatistics, University of Alberta, Edmonton Google Scholar.
- SILVA, D., 2015. *Signed distance function modeling with multiple categories*. Geostatistics Lessons.
- SILVA, D.; AND DEUTSCH, C., 2013 *Correcting distance function models to correct proportions*. In: CCG Annual Report.
- SINCLAIR, A. J.; AND BLACKWELL, G. H., 2002. *Applied mineral inventory estimation*. Cambridge University Press.
- SOUZA, L.E. 2002. *Estimativa de Incertezas e suas Aplicações na Classificação de Recursos Minerais*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 170p
- SRIVASTAVA, R. 2005. *Probabilistic modeling of ore lens geometry: An alternative to deterministic wireframes*. Mathematical Geology, p. 37(5):513-544.
- STRAUBHAAR, J.; RENARD, P.; MARIETROZ, G.; FROIDEVAUX, R.; AND BESSON, O., 2011. *An improved multiple-point algorithm using a list approach*. Mathematical Geosciences, 43(3): 305-328.
- STREBELLE, S. 2000. *Sequential simulation drawing structures from training images*. Ph.D. Tese, Stanford University, Stanford, EE.UU.
- STREBELLE, S. 2002. *Conditional simulation of complex geological structures using multiplepoint statistic*. Mathematical Geology, v. 34, p. 1-21.

- STREBELLE, S. B.; AND JOURNEL, A. G., 2001. *Reservoir modeling using multiple-point statistics*. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- WILDE, B. J.; AND DEUTSCH, C. V., 2012. *Kriging and simulation in presence of stationary domains: developments in boundary modeling*. In Geostatistics Oslo 2012 (pp. 289-300). Springer, Dordrecht.
- WILDE, B. J.; AND DEUTSCH, C. V. 2011a. *Simulating boundary realizations*. Centre for Computational Geostatistics Annual Report, v. 11.
- WILDE, B.; AND DEUTSCH, C., 2011b. *A new way to calibrate distance function uncertainty*. In: CCG Annual Report.
- XIE, Y.; DEUTSCH, C. V.; AND CULLICK, A. S., 2000. *Surface-geometry and trend modeling for integration of stratigraphic data in reservoir models*. In G., K. W. J. K. D., editor, GEOSTATS 2000: Cape Town, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Geostatistics Congress, Cape Town, South Africa.
- ZHANG, T.; AND JOURNEL, A., 2008. *Fast FILTERSIM simulation with score based distance*. Mathematical Geosciences, 40: 773-788.

**APÊNDICES**

## Apêndice A – Algoritmo Signed Distance C

```

1. #-----
2. #
3. # Signed Distance Function Calculator
4. # *****
5. #
6. # This SGeMS plugin calculates the anisotropic signed distances for each data
7. # point and each rock type.
8. #
9. # AUTHOR: Roberto Mentzingen Rolo
10. # Modified by: Flávio A. N. Amarante
11. #
12. #-----
13.
14. #!/bin/python
15. import sgems
16. import math
17. import numpy as np
18.
19. #Calculates the distances
20. def dist(x1, y1, z1, x2, y2, z2):
21.     return math.sqrt((x1 - x2) ** 2 + (y1 - y2) ** 2 + (z1 - z2) ** 2)
22.
23. #Defines the rotation and dilatation matrices
24. def rot(range1, range2, range3, azimuth, dip, rake, vetor):
25.
26.     if azimuth >= 0 and azimuth <=270:
27.         alpha = math.radians(90-azimuth)
28.     else:
29.         alpha = math.radians(450-azimuth)
30.         beta = -math.radians(dip)
31.         phi = math.radians(rake)
32.
33.     rot_matrix = np.zeros((3,3))
34.
35.     rot_matrix[0,0] = math.cos(beta)*math.cos(alpha)
36.     rot_matrix[0,1] = math.cos(beta)*math.sin(alpha)
37.     rot_matrix[0,2] = -math.sin(beta)
38.     rot_matrix[1,0] = (range1/range2)*(-
39.     math.cos(phi)*math.sin(alpha)+math.sin(phi)*math.sin(beta)*math.cos(alpha))
40.     rot_matrix[1,1] = (range1/range2)*(math.cos(phi)*math.cos(alpha)+math.sin(phi)*ma
41.     th.sin(beta)*math.sin(alpha))
42.     rot_matrix[1,2] = (range1/range2)*(math.sin(phi)*math.cos(beta))
43.     rot_matrix[2,0] = (range1/range3)*(math.sin(phi)*math.sin(alpha)+math.cos(phi)*ma
44.     th.sin(beta)*math.cos(alpha))
45.     rot_matrix[2,1] = (range1/range3)*(-
46.     math.sin(phi)*math.cos(alpha)+math.cos(phi)*math.sin(beta)*math.sin(alpha))
47.     rot_matrix[2,2] = (range1/range3)*(math.cos(phi)*math.cos(beta))
48.
49.     vetor = np.array(vetor)
50.
51.     return np.dot(rot_matrix, vetor)
52.
53. #Transform the data with the rotation/dilatation matrices
54. def anis_search(X, Y, Z, range1, range2, range3, azimuth, dip, rake):
55.
56.     X_linha = []
57.     Y_linha = []
58.     Z_linha = []
59.
60.     for i in range(len(X)):
61.         vet = [X[i],Y[i],Z[i]]
62.
63.         vet_rot = rot(range1, range2, range3, azimuth, dip, rake, vet)

```

```

60.
61.     X_linha.append(vet_rot[0])
62.     Y_linha.append(vet_rot[1])
63.     Z_linha.append(vet_rot[2])
64.
65.     return X_linha, Y_linha, Z_linha
66.
67. #Shows every parameter of the plugin in the command pannel
68. def read_params(a,j=''):
69.     for i in a:
70.         if (type(a[i])!=type({'a':1})):
71.             print j+"["+str(i)+"]="+str(a[i])
72.         else:
73.             read_params(a[i],j+"["+str(i)+""]")
74.
75. class signed_distances_C:
76.     def __init__(self):
77.         pass
78.
79.     def initialize(self, params):
80.         self.params = params
81.         return True
82.
83.     def execute(self):
84.
85.         '''#Execute the funtion read_params
86.         read_params(self.params)
87.         print self.params'''
88.
89.         #Get the grid, rock type property and C value
90.         grid = self.params['propertyselectornoregion']['grid']
91.         prop = self.params['propertyselectornoregion']['property']
92.         C = float(self.params['c_par']['value'])
93.
94.         #Error message
95.         if len(grid) == 0 or len(prop) == 0:
96.             print 'Select the rocktype property'
97.             return False
98.
99.         #Get the X, Y and Z coordinates and RT property
100.        X = sgems.get_property(grid, '_X_')
101.        Y = sgems.get_property(grid, '_Y_')
102.        Z = sgems.get_property(grid, '_Z_')
103.        RT = sgems.get_property(grid, prop)
104.
105.        elipsoide = self.params['ellipsoidinput']['value']
106.        elipsoide_split = elipsoide.split()
107.
108.        range1 = float(elipsoide_split[0])
109.        range2 = float(elipsoide_split[1])
110.        range3 = float(elipsoide_split[2])
111.
112.        azimuth = float(elipsoide_split[3])
113.        dip = float(elipsoide_split[4])
114.        rake = float(elipsoide_split[5])
115.
116.        X, Y, Z = anis_search(X, Y, Z, range1, range2, range3, azimuth, dip, rake)
117.
118.        #Creates a list of all rock types
119.        rt_list = []
120.        for i in RT:
121.            if i not in rt_list and not math.isnan(i):
122.                rt_list.append(i)
123.
124.        #Sort the rock type list in crescent order
125.        rt_list = [int(x) for x in rt_list]

```



```

126.         rt_list.sort()
127.
128.         #Create a empty distance matrix
129.         dist_matrix = np.zeros(shape = ((len(rt_list)), (len(RT))))
130.
131.         #Calculates the signed distances, and append it in the distance matrix
132.         for i in range(len(rt_list)):
133.             rock = rt_list[i]
134.
135.             for j in range(len(RT)):
136.
137.                 if math.isnan(RT[j]):
138.                     dist_matrix[i][j] = float('nan')
139.
140.                 elif RT[j] == rock:
141.                     dsmin = 1.0e21
142.
143.                     for k in range(len(RT)):
144.
145.                         if RT[j] != RT[k] and not math.isnan(RT[k]):
146.                             if (dist(X[j], Y[j], Z[j], X[k], Y[k], Z[k])) < dsmin:
147.                                 dsmin = (dist(X[j], Y[j], Z[j], X[k], Y[k], Z[k]))
148.
149.                                 dist_matrix[i][j] = -dsmin-C
150.
151.                 else:
152.                     dsmin = 1.0e21
153.
154.                     for k in range(len(RT)):
155.
156.                         if RT[k] == rock:
157.                             if (dist(X[j], Y[j], Z[j], X[k], Y[k], Z[k])) < dsmin:
158.                                 dsmin = (dist(X[j], Y[j], Z[j], X[k], Y[k], Z[k]))
159.
160.                                 dist_matrix[i][j] = dsmin+C
161.
162.         #Creates the signed distances properties
163.         lst_props_grid=sgems.get_property_list(grid)
164.
165.         for k in range(len(dist_matrix)):
166.             prop_final_data_name = 'Signed_Distances_C_' + str(C)+'_RT_'+ str(rt_list[
167. k])
168.                 if (prop_final_data_name in lst_props_grid):
169.                     flag=0
170.                     i=1
171.                     while (flag==0):
172.                         test_name=prop_final_data_name+'-'+str(i)
173.                         if (test_name not in lst_props_grid):
174.                             flag=1
175.                             prop_final_data_name=test_name
176.                             i=i+1
177.
178.                     list = dist_matrix[k].tolist()
179.                     sgems.set_property(grid, prop_final_data_name, list)
180.
181.         return True
182.
183.     def finalize(self):
184.         return True
185.
186.     def name(self):
187.         return "signed_distances_C"
188.
189.     #####
190.     def get_plugins():
191.         return ["signed_distances_C"]

```

## Apêndice B – Algoritmo Classifier C

```

1. #-----
2. #
3. # Signed Distances Function Classifier C
4. # *****
5. #
6. # This SGeMS plugin interpolates, simulates and classify the signed distance
7. # function calculated, and creates realizations of an geologic model.
8. #
9. #
10. # AUTHORS: Flávio A. N. Amarante and Roberto Mentzinger Rolo
11. #
12. #-----
13.
14. #!/bin/python
15. import sgems
16. import math
17. import numpy as np
18. import random
19. import copy
20. from scipy.stats import norm
21. import sys
22.
23. #Creates a random path given the size of the grid
24. def random_path(prop):
25.     nodes_not_nan = []
26.     for i in range(len(prop)):
27.         if not math.isnan(prop[i]):
28.             nodes_not_nan.append(i)
29.     random.shuffle(nodes_not_nan)
30.     return nodes_not_nan
31.
32. #Calculates the proportions of variables on a list
33. def proportion(var, RT):
34.     rock_types = []
35.     target_prop = []
36.     for k in range(len(RT)):
37.         target_prop.append(0)
38.         rock_types.append(int(RT[k].split('RT_-')[1]))
39.     rock_types.sort()
40.     var_not_nan = []
41.     for i in var:
42.         if not math.isnan(i):
43.             var_not_nan.append(i)
44.     for i in range(len(rock_types)):
45.         target_prop[i] = float(var.count(rock_types[i]))/len(var_not_nan)
46.     return target_prop
47.
48. def create_variable(grid, name, list):
49.     lst_props_grid = sgems.get_property_list(grid)
50.     prop_final_data_name = name
51.
52.     if (prop_final_data_name in lst_props_grid):
53.         flag = 0
54.         i = 1
55.         while (flag == 0):
56.             test_name = prop_final_data_name + '-' + str(i)
57.             if (test_name not in lst_props_grid):
58.                 flag = 1
59.                 prop_final_data_name = test_name
60.             i = i + 1
61.
62.     sgems.set_property(grid, prop_final_data_name, list)
63.

```

```

64. def classifier(grid, sim_val, interpol_val, C, var_n):
65.     #sim_val = sgems.get_property(grid, sim_val)
66.     #interpol_val = sgems.get_property(grid, interpol_val)
67.
68.     trans_sim = sim_val
69.     for n,i in enumerate(sim_val):
70.         if not math.isnan(i):
71.             trans_sim[n] = (2*C*norm.cdf(i)-C)
72.
73.     class_blocks = trans_sim
74.     for n,i in enumerate(sim_val):
75.         if not math.isnan(i):
76.             if i > interpol_val[n]:
77.                 class_blocks[n] = 1
78.             if i < interpol_val[n]:
79.                 class_blocks[n] = 0
80.     for n,i in enumerate(interpol_val):
81.         if i < -C:
82.             class_blocks[n] = 1
83.         if i > C:
84.             class_blocks[n] = 0
85.
86.     FN = "Class_C_("+str(var_n)+"_C_"+ str(C)
87.     create_variable(grid, FN, class_blocks)
88.
89.     #Transform i,j,k in n
90.     def ijk_in_n(grid, i, j, k):
91.         dims = sgems.get_dims(grid)
92.         n = k*dims[0]*dims[1]+j*dims[0]+i
93.         return n
94.
95.     #Crestes a list with indices of the neighbors valid blocks
96.     def neighb(grid, indice):
97.         ijk = sgems.get_ijk(grid, indice)
98.         neighborhood = []
99.         for i in range(ijk[0]-1,ijk[0]+2):
100.            for j in range(ijk[1]-1,ijk[1]+2):
101.                for k in range(ijk[2]-1,ijk[2]+2):
102.                    ijk_blk = [i,j,k]
103.                    neighborhood.append(ijk_blk)
104.            dims = sgems.get_dims(grid)
105.            neighborhood_cp = copy.copy(neighborhood)
106.            for i in neighborhood_cp:
107.                if dims[2] == 1:
108.                    if i[0] < 0 or i[1] < 0:
109.                        neighborhood.remove(i)
110.                    elif i[0] > (dims[0] - 1) or i[1] > (dims[1] - 1):
111.                        neighborhood.remove(i)
112.                    elif i[2] != 0:
113.                        neighborhood.remove(i)
114.                    elif i == sgems.get_ijk(grid, indice):
115.                        neighborhood.remove(i)
116.                else:
117.                    if i[0] < 0 or i[1] < 0 or i[2] < 0:
118.                        neighborhood.remove(i)
119.                    elif i[0] > (dims[0] - 1) or i[1] > (dims[1] - 1) or i[2] > (dims[2]
- 1):
120.                        neighborhood.remove(i)
121.                    elif i == sgems.get_ijk(grid, indice):
122.                        neighborhood.remove(i)
123.            neighborhood_n = []
124.            for i in neighborhood:
125.                neighborhood_n.append(ijk_in_n(grid,i[0],i[1],i[2]))
126.            return neighborhood_n
127.
128.

```

```

129. # Shows every parameter of the plugin in the command pannel
130. def read_params(a, j=''):
131.     for i in a:
132.         if (type(a[i]) != type({'a': 1})):
133.             print j + "[" + str(i) + "]" = " + str(a[i])
134.         else:
135.             read_params(a[i], j + "[" + str(i) + "]")
136.
137. class C_classifier:
138.     def __init__(self):
139.         pass
140.
141.     def initialize(self, params):
142.         self.params = params
143.         return True
144.
145.     def execute(self):
146.
147.         #Execute the funtion read_params
148.         #read_params(self.params)
149.         #print self.params'''
150.
151.         #temp = sys.stdout
152.         #sys.stdout = sys.stderr
153.         #sys.stderr = temp
154.
155.         # Get the grid and rock type propery
156.         grid = self.params['propertyselectornoregion']['grid']
157.         prop = self.params['propertyselectornoregion']['property']
158.
159.         # Get the X, Y and Z coordinates and RT property
160.         X = sgems.get_property(grid, '_X_')
161.         Y = sgems.get_property(grid, '_Y_')
162.         Z = sgems.get_property(grid, '_Z_')
163.         RT_data = sgems.get_property(grid, prop)
164.
165.         # Getting properties
166.         grid_krig = self.params['gridinter']['value']
167.         grid_var = self.params['gridselectorbasic']['value']
168.         props = (self.params['orderedpropertyselector']['value']).split(';')
169.         n_var = int(self.params['indicator_regionalization_input']['number_of_indicat
or_group'])
170.         n_prop = int(self.params['orderedpropertyselector']['count'])
171.         min_cond = self.params['spinBox_2']['value']
172.         max_cond = self.params['spinBox']['value']
173.         C_val = float(self.params['c_par']['value'])
174.
175.         # Error messages
176.         if len(grid_var) == 0 or len(grid_krig) == 0:
177.             print 'Select the variables'
178.             return False
179.
180.         if n_var != n_prop:
181.             print 'Number of variables and number of variograms models are diferent.'
182.
183.             return False
184.
185.         # Creating an empty list to store the interpolated distances
186.         SG_OK_list = []
187.
188.         # Loop in every variable
189.         for i in xrange(0, n_var):
190.             #..... Interpolation .....#
191.
192.             #Getting variables Interpolation

```

```

193.         prop_HD = props[i]
194.         prop_name = "Interpolated_" + str(prop_HD)
195.         prop_name_var = "Interpolated_" + str(prop_HD) + ' krig_var'
196.         var_str = ''
197.         indicator_group = "Indicator_group_" + str(i + 1)
198.         elipsoide = self.params['ellipsoidinput']['value']
199.         n_struct = int(self.params['indicator_regionalization_input'][indicator_g
roup]['Covariance_input']['structures_count'])
200.
201.         # Error message
202.         if n_struct == 0:
203.             print 'Variogram have no structures'
204.             #continue
205.             return False
206.
207.         # Loop in every variogram structure - Interpolation
208.         for j in xrange(0, n_struct):
209.
210.             # Getting variogram parameters
211.             Structure = "Structure_" + str(j + 1)
212.             cov_type = self.params['indicator_regionalization_input'][indicator_g
roup]['Covariance_input'][Structure]['Two_point_model']['type']
213.             cont = self.params['indicator_regionalization_input'][indicator_group
]['Covariance_input'][Structure]['Two_point_model']['contribution']
214.
215.             if cov_type == 'Nugget Covariance':
216.                 # Writing variogram parameters on a variable in nugget effect cas
e
217.                 var_str = var_str + '<{} type="{}"> <Two_point_model contributi
on="{}" type="{}" > </Two_point_model> </Structure_1>'.format(Structure, 'C
ovariance', cont, cov_type, Structure)
218.                 print var_str
219.             else:
220.                 range1 = self.params['indicator_regionalization_input'][indicator
_group]['Covariance_input'][Structure]['Two_point_model']['ranges']['range1']
221.                 range2 = self.params['indicator_regionalization_input'][indicator
_group]['Covariance_input'][Structure]['Two_point_model']['ranges']['range2']
222.                 range3 = self.params['indicator_regionalization_input'][indicator
_group]['Covariance_input'][Structure]['Two_point_model']['ranges']['range3']
223.                 rake = self.params['indicator_regionalization_input'][indicator_g
roup]['Covariance_input'][Structure]['Two_point_model']['angles']['rake']
224.                 dip = self.params['indicator_regionalization_input'][indicator_gr
oup]['Covariance_input'][Structure]['Two_point_model']['angles']['dip']
225.                 azimuth = self.params['indicator_regionalization_input'][indicato
r_group]['Covariance_input'][Structure]['Two_point_model']['angles']['azimuth']
226.
227.                 # Writing variogram parameters on a variable in other cases
228.                 var_str = var_str + '<{} type="{}"> <Two_point_model contributi
on="{}" type="{}" > <ranges range1="{}" range2="{}" range3="{}" /> <
angles azimuth="{}" dip="{}" rake="{}" /> </Two_point_model> </{}>'.format
(Structure, 'Covariance', cont, cov_type, range1, range2, range3, azimuth, dip, rake,
Structure)
229.
230.         # Calling ordinary kriging for each variable, using the variograms parame
ters above
231.         sgems.execute('RunGeostatAlgorithm kriging::/GeostatParamUtils/XML::<par
ameters> <algorithm name="kriging" /> <Variogram structures_count="{}" > {}
</Variogram> <ouput_kriging_variance value="0" /> <output_n_samples_ value=
"0" /> <output_average_distance value="0" /> <output_sum_weights value="0
" /> <output_sum_positive_weights value="0" /> <output_lagrangian value="
0" /> <Nb_processors value="-
2" /> <Grid_Name value="{}" region="" /> <Property_Name value="{}" /> <
Hard_Data grid="{}" property="{}" region="" /> <Kriging_Type type="Ordinar
y Kriging (OK)" > <parameters /> </Kriging_Type> <do_block_kriging value="1"
 /> <npoints_x value="5" /> <npoints_y value="5" /> <npoints_z value="5
" /> <Min_Conditioning_Data value="{}" /> <Max_Conditioning_Data value="{}"

```

```

/> <Search_Ellipsoid value="{}" /> <AdvancedSearch use_advanced_search="0"><
/AdvancedSearch> </parameters>'.format(n_struct, var_str, grid_krig, prop_name, grid
_var, prop_HD, min_cond, max_cond, elipsoide))
232.
233.         SG_OK_list = sgems.get_property(grid_krig, prop_name)
234.
235.         # Uncertainty Zone
236.         zone_name = "UZ_C_"+str(C_val)
237.         zone = np.array(SG_OK_list)
238.         m1 = zone < C_val
239.         m2 = zone > -C_val
240.         mask = np.logical_and(m1,m2)
241.         uzz = mask.astype('int').tolist()
242.         sgems.set_region(grid_krig,zone_name,uzz)
243.
244.         #..... Simulation .....#
245.
246.         #Creating an empty list to store the simulated distances
247.         SG_sim_list = []
248.
249.         # Getting variables Simulation
250.         grid_sim_region = zone_name
251.         prop_name_sim = "Sim_C_" + str(C_val)
252.         var_str_s = ''
253.         nb_realz = self.params['spinBox_3']['value']
254.         max_cond_hard_data = self.params['Max_Conditioning_Data']['value']
255.         max_cond_prev_sim_data = self.params['Max_Conditioning_Simul_Data']['valu
e']
256.         number_pro = self.params['spinBox_6']['value']
257.         sim_group = "Indicator_group_" + str(i + 1)
258.         elipsoide_sim = self.params['Search_Ellipsoid_Sim']['value']
259.         n_struct_s = int(self.params['sim_regionalization_input'][sim_group]['Cov
ariance_input']['structures_count'])
260.         HD = ""
261.         p_HD = ""
262.
263.         #Error message
264.         if n_struct_s == 0:
265.             print 'Variogram have no structures'
266.             return False
267.
268.         # Loop in every variogram structure
269.         for j in xrange(0, n_struct):
270.
271.             # Getting variogram parameters
272.             Structure_s = "Structure_" + str(j + 1)
273.             cov_type_s = self.params['sim_regionalization_input'][sim_group]['Cov
ariance_input'][Structure_s]['Two_point_model']['type']
274.             cont_s = self.params['sim_regionalization_input'][sim_group]['Covaria
nce_input'][Structure_s]['Two_point_model']['contribution']
275.
276.             if cov_type_s == 'Nugget Covariance':
277.                 #Writing variogram parameters on a variable in nugget effect case
278.                 var_str_s = var_str + '<{} type="{}"> <Two_point_model contribu
tion="{}" type="{}" > </Two_point_model> </Structure_1> '.format(Structure,
'Covariance', cont, cov_type, Structure)
279.
280.             else:
281.                 srange1 = self.params['sim_regionalization_input'][sim_group]['Co
variance_input'][Structure_s]['Two_point_model']['ranges']['range1']
282.                 srange2 = self.params['sim_regionalization_input'][sim_group]['Co
variance_input'][Structure_s]['Two_point_model']['ranges']['range2']
283.                 srange3 = self.params['sim_regionalization_input'][sim_group]['Co
variance_input'][Structure_s]['Two_point_model']['ranges']['range3']

```

```

284.         srake = self.params['sim_regionalization_input'][sim_group]['Cova
riance_input'][Structure_s]['Two_point_model']['angles']['rake']
285.         sdip = self.params['sim_regionalization_input'][sim_group]['Covar
iance_input'][Structure_s]['Two_point_model']['angles']['dip']
286.         sazimuth = self.params['sim_regionalization_input'][sim_group]['C
ovariance_input'][Structure_s]['Two_point_model']['angles']['azimuth']
287.
288.         # Writing variogram parameters on a variable in other cases
289.         var_str_s = var_str + '<{} type="{}"> <Two_point_model contribu
tion="{}" type="{}" > <ranges range1="{}" range2="{}" range3="{}" />
<angles azimuth="{}" dip="{}" rake="{}" /> </Two_point_model> </{}>'.forma
t(Structure_s, 'Covariance', cont_s, cov_type_s, srange1, srange2, srange3, sazimuth,
sdip, srake, Structure_s)
290.
291.         # Calling sgsim, using the variograms parameters above
292.         sgems.execute('RunGeostatAlgorithm sgsim::/GeostatParamUtils/XML::<param
eters> <algorithm name="sgsim" /> <Simulation_seed type="clock"/> <Path type="r
andom"><Seed type="clock"/></Path> <Nb_processors value="{}" /> <Grid_Name valu
e="{}" region="{}" /> <Assign_Hard_Data value="0" /> <Property_Name value="
{}" reuse_property="0" /> <Nb_Realizations value="{}" /> <Use_LVM value="0" /
> <Max_Conditioning_Data value="{}" /> <Max_Conditioning_Simul_Data value="
{}" /> <Search_Ellipsoid value="{}" /> <AdvancedSearch use_advanced_search="
0"></AdvancedSearch> <Hard_Data grid="{}" property="{}" region="" /> <U
se_Target_Histogram value="0" /> <Export_nscore value="1" /> <Use_break_tie_index val
ue="0" /> <nonParamCdf ref_in_distribution="0" ref_on_file="0" ref_on_grid="0" bre
ak_ties_indices="0" grid="{}" region="" property="{}" is_weight="0"><LTI_type f
unction="No extrapolation" extreme="0" omega="" /> <UTI_type function="No extrapo
lation" extreme="0" omega="" /> </nonParamCdf> <Covariance_input structures_c
ount="{}" > {} </Covariance_input> </parameters>'.format(number_pro, grid_krig, grid
_sim_region, prop_name_sim, nb_realz, max_cond_hard_data, max_cond_prev_sim_data, eli
psoides_sim, HD, p_HD, grid_var, prop_HD, n_struct_s, var_str_s))
293.
294.         Simulations = sgems.get_properties_in_group(grid_krig,prop_name_sim)
295.
296.         for prop in Simulations:
297.             ss = sgems.get_property(grid_krig, prop)
298.             SG_sim_list.append(ss)
299.
300.         #classifying categories
301.         for i in SG_sim_list:
302.             classifier(grid_krig,i,SG_OK_list,C_val,prop_HD)
303.
304.         #Deleting interpolation and simulations
305.         if self.params['Keep_in']['value']=='0':
306.             sgems.execute('DeleteObjectProperties {}:{}'.format(grid_krig, prop
_name))
307.         if self.params['keep_sim']['value']=='0':
308.             sgems.execute('DeleteObjectProperties {}:{}'.format(grid_krig, prop
_name_sim))
309.
310.         return True
311.
312.     def finalize(self):
313.
314.         return True
315.
316.     def name(self):
317.
318.         return "C_classifier"
319.
320.     #####
321.     def get_plugins():
322.         return ["C_classifier"]

```

## Apêndice C – Algoritmo Hierarchical Union

```

1. #-----
2. #
3. # Hierarchical Union
4. # *****
5. #
6. # This plugin joins the realization of each category in an realization
7. # of the geological model.
8. #
9. # AUTHOR: Flávio A. N. Amarante
10. #
11. #-----
12.
13. #!/bin/python
14. import sgems
15. import math
16. import numpy as np
17. from scipy.stats import norm
18.
19. # C values
20. C1 = 100
21. C2 = 50
22. C3 = 75
23. C4 = 150
24.
25. #Properties
26. grid = "sim-1"
27. real = 5
28. prefix = "s"
29. sim_num = [1,2,3,4]
30.
31. # Get Grid Properties
32. xgrid = sgems.get_property(grid,"_X_")
33. ygrid = sgems.get_property(grid,"_Y_")
34. zgrid = sgems.get_property(grid,"_Z_")
35.
36. #Lists of realizations classified in uncertainty zones
37. t2 = []
38. t3 = []
39. t4 = []
40. t5 = []
41.
42.
43. # Union of categories
44. tt=0
45. for i,j,k,m in zip(t2,t3,t4,t5):
46.
47.     A = sgems.get_property(grid,i)
48.     B = sgems.get_property(grid,j)
49.     C = sgems.get_property(grid,k)
50.     D = sgems.get_property(grid,m)
51.     Z = []
52.     S = []
53.
54.     for i in range(0, len(A)):
55.         if A[i]==1.0:
56.             Z.append(2)
57.         else:
58.             if B[i]==1.0:
59.                 Z.append(4)
60.             else:
61.                 if C[i]==0.0:
62.                     Z.append(0)
63.                 else:

```



```
64.             if D[i]==1.0:
65.                 Z.append(3)
66.             else:
67.                 Z.append(1)
68.
69.         for i in range(0, len(A)):
70.             if A[i]==1.0:
71.                 S.append(2)
72.             else:
73.                 if B[i]==1.0:
74.                     S.append(0)
75.                 else:
76.                     if C[i]==0.0:
77.                         S.append(0)
78.                     else:
79.                         if D[i]==1.0:
80.                             S.append(3)
81.                         else:
82.                             S.append(1)
83.
84.
85.         name1= "SD-C_real_" + str(tt)
86.         name2= "SD-C_rr_" + str(tt)
87.         sgems.set_property(grid,name1,Z)
88.         sgems.set_property(grid,name2,S)
89.         print "Union: "+str(tt)+" do total de "+str(real)+" items."
90.         tt=tt+1
```