RONDINELLI DE SOUSA SILVA

APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA WIRELESS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DO PLANEJAMENTO DE LAVRA INCORPORANDO A INCERTEZA GEOLÓGICA

São Paulo

2006

RONDINELLI DE SOUSA SILVA

APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA WIRELESS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DO PLANEJAMENTO DE LAVRA INCORPORANDO A INCERTEZA GEOLÓGICA

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia Mineral.

Orientador:
Prof. Dr. Giorgio de Tomi

São Paulo

2006

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 06 de novembro de 2006.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Sousa Silva, Rondinelli de
Aplicação de tecnologia wireless para controle de qualidade do planejamento de lavra incorporando a incerteza geológica / R. de Sousa Silva. -- São Paulo, 2006.
94 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.*Wireless* 2.Mineração (Planejamento) 3.Controle da qualidade 4.Simulação condicional I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Rondinelli de Sousa Silva

Aplicação de tecnologia wireless para controle de qualidade do planejamento de lavra incorporando a incerteza geológica

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia Mineral.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adriano Caranassios

Instituição: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM Assinatura:

Prof. Dr. Lindolfo Soares

Instituição: Universidade de São Paulo – USP Assinatura:

Prof. Dr. Giorgio de Tomi

Instituição: Universidade de São Paulo – USP Assinatura:

Dedico este trabalho aos meus pais, Ramos e Fátima, aos meus irmãos por todo incentivo, carinho e amizade. À minha noiva Luciana por toda confiança, amor e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Giorgio de Tomi, pela orientação, incentivo e colaboração na elaboração desta pesquisa, pela acolhida e oportunidade de fazer parte do Laboratório de Planejamento e Otimização de lavra – LAPOL.

Aos estimados colegas e amigos do LAPOL pelas inúmeras contribuições, sempre compartilhando suas experiências para enriquecimento desta dissertação e à secretária Evelyn Vieira por toda ajuda na confecção dos exemplares deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da USP por propiciar sempre condições adequadas para o desenvolvimento de pesquisas científicas. A Prof. Dr. Homero Delboni Jr. por todo incentivo dado para conclusão desta dissertação e ao secretario Washington Canechia por toda ajuda e paciência.

Ao Prof. Dr. João Felipe Costa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS pela colaboração, comentários e sugestões sempre fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

RESUMO

As etapas envolvidas na produção de uma mina podem ser modeladas e gerenciadas de forma mais eficiente quando há um fluxo mútuo e contínuo de informações, que vão desde a geologia até às especificações do produto final. Através da modelagem e gerenciamento das diversas etapas envolvidas no processo mineiro é possível melhorar significativamente o planejamento e operação das minas. A incorporação de componentes tecnológicos diversos tais como *software* de mineração, *software* de realidade virtual e componentes *wireless*, permite tomar decisões baseadas em modelos mais realísticos e precisos. Para tal, é proposta uma metodologia de integração destas tecnologias no controle das tarefas de decapeamento no planejamento de lavra de curto prazo, visando aprimorar o controle de qualidade no minério lavrado através do uso de técnicas de simulação condicional. A integração dessas tecnologias permite a transmissão de dados em tempo real entre planejamento e operação de mina, proporcionando melhorias na produtividade, na eficiência e no controle dos processos, além de promover melhorias na qualidade do material lavrado através do conhecimento do nível de incerteza associado em cada plano operacional de lavra. Uma solução composta por tecnologias integradas permite que o pessoal de operação de mina alcance os resultados de forma mais rápida e eficiente, melhorando significativamente a produtividade das operações da mina e a qualidade do minério lavrado.

ABSTRACT

The stages involved in mining production can be modeled and managed in a more efficient way when there is an integrated and continuous flow of information, from geology all the way down the mine value chain to the final specifications of the product. It is possible to improve the efficiency of decision-making in mine planning and operations through proper data-flow management. With the incorporation of technological components such as mining software, virtual reality software and wireless components, it is possible to take decisions based on models that are more accurate and realistic. This research considers a methodology technology integration for the tasks of waste moving in the short term mine planning, to improve the quality control in mined ore using conditional simulation techniques. The integration of these technologies allows instantaneous transmission of data between mine planning and the mine operation, improving productivity and efficiency in process control. In addition, it provides a measure of the uncertainty associated with the operational mining planning. An integrated solution allows mine planners and equipment operators to obtain quicker and more efficient results, improving significantly productivity in the operation of the mine and quality of the mined ore.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 13

1.1. INTRODUÇÃO 13

1.2. OBJETIVO 16

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

2.1. SISTEMA DE INFORMAÇÕES INTEGRADAS ERP-CVM 18

2.2. SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA CONDICIONAL 21

2.3. TECNOLOGIA *WIRELESS* NA MINERAÇÃO 23

3. METODOLOGIA 26

4. ESTUDO DE CASO 31

4.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA 31

4.2. EMPRESA E HISTÓRICO 34

4.3. ASPECTOS GEOLÓGICOS, GEOMORFOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS 35

4.4. PROCESSO DE FORMAÇÃO DA BAUXITA 38

4.5. TESTE DE TECNOLOGIA *WIRELESS* NAS OPERAÇÕES DE DECAPEAMENTO 45

4.6. ELABORAÇÃO DO MODELO DE SUPERFÍCIE 51

4.7 ANALISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS 52

4.8. DESAGRUPAMENTO DAS AMOSTRAS 55

4.9 TRANSFORMAÇÃO GAUSSIANA 60

4.10. ANÁLISE DE CONTINUIDADE ESPACIAL DOS DADOS 62

4.11. VALIDAÇÃO CRUZADA 68

4.12. VERIFICAÇÃO DE MULTINORMALIDADE DOS DADOS 70

4.13. GERAÇÃO DOS MODELOS SIMULADOS 71

4.14. SUPORTE AMOSTRAL 74

4.15. VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES 75

4.16. MUDANÇA DE SUPORTE 78

4.17. MODELO DE SUPERFÍCIES SIMULADAS 81

4.18. ANÁLISE DE RESULTADOS 85

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 90

5.1. RECOMENDAÇÕES 91

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A Cadeia de Valor Mineral, modificado de De Tomi e Ceotto (2002). 19

Figura 2. Curvas de valores estimados por krigagem e simulados condicionalmente comparadas com a curva dos valores reais. Gráfico modificado de Chilès & Delfiner (1999). 22

Figura 3. Gráficos mostrando os diferentes resultados da krigagem e da simulação condicional, gráfico modificado de Gambin (2003). 23

Figura 4. Esquema mostrando transmissão de dados via GPS, modificado de Caterpillar (1999). 25

Figura 5. Estrutura genérica do sistema IDEF0, De Tomi (2004). 28

Figura 6. Níveis de informação no sistema IDEF0, De Tomi (2004). 28

Figura 7. Conversão de arquivos para software de gerenciamento de dados, De Tomi (2004). 29

Figura 8. Diagrama mostrando o gerenciamento da informação de forma integrada, De Tomi (2004). 30

Figura 9. Método de lavra em tiras aplicado geralmente em depósitos tabulares não profundos, foto cedida pela Mineração Rio Capim Caulim, Grupo Imerys (2005). 31

Figura 10. Modelo atual das operações de lavra mediante o uso do método de lavra em tiras, modificado de Gatti e Barros (2003). 32

Figura 11. Mapa de localização da área de estudo, modificado de Gatti e Barros (2003). 34

Figura 12. Mapa geológico local da área de estudo. Modificado de Gatti e Barros (2003). 36

Figura 13. Aspecto geral das operações de lavra de uma das minas da MRN, modificado de Gatti e Barros (2003). 42

Figura 14. Modelo atual da atividade de decapeamento da mina, modificado de Gatti e Barros (2003). 44

Figura 15. Modelo proposto para a atividade de decapeamento da mina. 44

Figura 16. Sistema CAES instalado em dois tratores D11R na MRN, onde: A) transmissor de rádio; B) antena para leitura do terreno; C) receptor de dados GPS; D) computador de bordo embarcado nos tratores, Caterpillar (1999). 46

Figura 17. Computador de bordo embarcado nos tratores mostrando vistas do projeto, mapa de fundo, parâmetros operacionais e posição do trator em relação à superfície de corte, Gatti e Barros (2003). 47

Figura 18. a) Litologia típica de um depósito tabular de bauxita no norte do Brasil e b) definição das superfícies que delimitam o minério, modificado de Gatti e Barros (2003). 47

Figura 19. Diluição e perdas associadas às operações de decapeamento de mina. 48

Figura 20. Superfície simulada condicionalmente em software de modelagem geológica e planejamento de lavra, fornecendo a incerteza associada ao plano operacional. 50

Figura 21. Esquema da metodologia para geração de modelos através de simulação seqüencial gaussiana. Modificado de Datamine (2004). 52

Figura 22. Pontos do contato superior e do contato inferior das superfícies que delimitam o minério no furo alm_dh2. 53

Figura 23. Mapa de localização das amostras utilizadas na mina bauxita em estudo. 56

Figura 24. Método da poligonal, modificado de Isaaks e Srivastava (1989). 57

Figura 25. Método das células móveis, modificado de Isaaks e Srivastava (1989). 58

Figura 26. a) Histograma dos dados originais para os pontos do contato (PT_TOP) da superfície capeamento-minério, b) histograma dos dados desagrupados para os pontos do contato (PT_TOP) da superfície capeamento-minério. 59

Figura 27. Transformação gaussiana através da correspondência ponto a ponto entre a distribuição original e a distribuição normalizada, modificado de Costa (2003). 61

Figura 28. a) Histograma dos dados desagrupados para os pontos do contato PT_TOP, b) histograma dos dados normalizados para os pontos do contato PT_TOP. 62

Figura 29. Variograma experimental omnidirecional dos pontos do contato PT_TOP. 64

Figura 30. Mapa de contornos variográficos dos pontos PT_TOP. 65

Figura 31. Anisotropia geométrica representada por uma elipse ajustada às oitos distâncias de correlação medidas nos variogramas direcionais para os pontos PT_TOP. 66

Figura 32. Modelo variográfico teórico ajustado para os dados normalizados PT_TOP nas direções de maior e menor continuidade espacial. 67

Figura 33. Gráfico dos valores reais contra os valores estimados dos pontos do contato normalizado PT_TOP. 69

Figura 34. Histograma de três simulações escolhidas aleatoriamente dos pontos PT_TOP no espaço original dos dados. 76

Figura 35. Modelos variográficos experimentais de três simulações escolhidas aleatoriamente dos pontos normalizados PT_TOP na direção de maior continuidade espacial. 77

Figura 36. Mudança de suporte das simulações baseada nas dimensões mínimas de corte (aproximadamente 7,0m) do equipamento utilizado nas operações de decapeamento da mina do estudo de caso, modificado de Caterpillar (1999). 79

Figura 37. Modelo de blocos do contato capeamento-minério gerado a partir das superfícies simuladas condicionalmente. 82

Figura 38. Operação típica de decapeamento de mina utilizando o método de lavra em tiras, modificado de Gatti e Barros (2003). 83

Figura 39. Detalhe da superfície operacional de corte a um nível de 10% de diluição máxima no contato capeamento-minério em uma determinada área do platô. 84

Figura 40. Modelo de superfícies simuladas e superfície operacional de corte no contato capeamento minério. 84

Figura 41. Procedimentos para geração do plano operacional de lavra. 85

Figura 42. Superfície operacional planejada de corte, com indicação das áreas de diluição e perdas de minério, medidos a partir de um modelo de blocos em 3 dimensões. 86

Figura 43. Cartões de memória usados para transmissão de dados entre escritório e equipamentos. 87

Figura 44. Modelo virtual das operações de decapeamento de mina integradas em tempo real. 89

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Introdução

Os avanços nas comunicações nos últimos anos possibilitaram o surgimento de várias tecnologias que procuram atender a real necessidade de seus usuários, com a melhor qualidade possível. Nos últimos anos a comunicação sem fio conhecida popularmente como *wireless* ganhou um espaço considerável nas tecnologias de transmissão de dados, deixando de existir apenas nas comunicações de longa distância (feitas através de satélite), para fazer parte de ambientes locais. Essa tendência foi fortalecida pelo investimento de instituições e empresas no sentido de aplicar a transmissão sem fio em redes de computadores (Alves Jr.; Silva, 2005).

As redes *wireless* oferecem uma série de vantagens sobre redes fixas, como por exemplo, velocidade, mobilidade, flexibilidade, simplicidade na instalação, robustez, baixos custos de manutenção, etc.

Este tipo de tecnologia possibilita conexões em banda larga em canais de freqüência de rádio, infravermelho ou laser. As conexões de banda larga são aquelas que permitem que o usuário conecte seu computador à *Internet* com velocidades maiores do que as normalmente usadas em linhas discadas.

A conexão por infravermelho é pouco usada porque sua faixa de freqüência fica logo abaixo da freqüência da luz visível e por isso os sinais transmitidos devem ser bem fortes com alta intensidade para não permitir a interferência da luz externa. A

distância máxima de comunicação é limitada a aproximadamente 30 metros mesmo com os dispositivos potentes da atualidade.

A conexão através do uso de laser pode alcançar distâncias de 200 a 300 metros com visada direta, sendo bastante utilizada, por exemplo, para conectar duas redes sem fio, cada uma cobrindo um prédio.

As freqüências de rádio são as mais utilizadas em redes de transmissão *wireless*. Por sua natureza, tais redes são adequadas tanto para ligações ponto a ponto quanto para ligações multiponto. As redes sem fio baseadas em radiodifusão são uma alternativa viável para onde é difícil instalar cabos metálicos ou cabos de fibra óptica. Seu emprego é particularmente importante para comunicações entre computadores portáteis em rede local móvel (Alves Jr.; Silva, 2005).

Este tipo de tecnologia está associado a variados tipos de negócios, e na mineração, mais especificamente, percebe-se que, somada à transmissão de dados sem fio, a tecnologia *wireless* e o GPS – Sistema de Posicionamento Global *(Global Positioning System)* dão origem a uma ferramenta inovadora de georreferenciamento de informações, atualização e verificação de dados em tempo real.

Atualmente, os fabricantes de equipamentos de carga e transporte para mineração têm desenvolvido tecnologias muito sofisticadas para o controle de desempenho e acompanhamento das necessidades de manutenção dos seus equipamentos

baseada em componentes *wireless*, permitindo assim, um mapeamento completo das atividades envolvidas na lavra tanto de minas a céu aberto como subterrânea.

Por outro lado, vê-se que a utilização de *software* de modelagem e planejamento de lavra apresenta um estado maduro de utilização nas empresas de mineração no Brasil e no mundo.

Nos últimos anos tais *software* tiveram uma ampliação da sua área de aplicação, auxiliando não somente nas tarefas de modelagem geológica e planejamento de lavra, como também dando suporte ao controle de qualidade do minério nas atividades de curto prazo, através do uso de sistemas de transmissão informações em tempo real nas operações da mina.

Hoje existe um esforço por parte das empresas de mineração na busca de soluções para utilização destes sistemas de forma mais integrada com o objetivo de eliminar ilhas de informação, permitindo uma maior flexibilidade no manuseio e controle dos dados, e proporcionando uma melhor visibilidade corporativa da informação da mina. Ilhas de informação é um termo comumente utilizado na indústria e se refere às informações que são tratadas de forma individual sem um compartilhamento de informações com outros departamentos

A presente pesquisa de mestrado propõe o uso conjunto de dois sistemas integrados (*software* de planejamento de lavra + componentes *wireless*) para o planejamento de lavra de curto prazo. Tal uso deve permitir que as equipes de planejamento e operação de lavra tenham acesso às informações sobre a qualidade

do minério em tempo real, através da medida do nível de incerteza associada ao plano de lavra, mediante o uso de técnicas de simulação condicional, e possam incorporá-la aos processos de tomada de decisões.

1.2. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo estudar a integração da tecnologia *wireless* ao controle das tarefas de decapeamento no planejamento de lavra de curto prazo, visando aprimorar o controle de qualidade no minério lavrado através do uso de técnicas de simulação condicional.

De forma a alcançar o objetivo acima descrito, as seguintes etapas foram cumpridas:

(a) Definição do problema e discussão de propostas científicas para sua solução;

(b) Revisão bibliográfica detalhada sobre o tema do para a abordagem de aplicações de tecnologia *wireless*; procedimentos de planejamento de curto prazo; controle de qualidade na lavra através de técnicas de simulação seqüencial condicional;

(c) Desenvolvimento de uma metodologia para integração da tecnologia *wireless* com o planejamento de lavra, visando o aprimoramento do controle de qualidade no minério;

(d) Teste da metodologia proposta junto a um estudo de caso, com descrição da sua implantação em escala piloto e dos resultados obtidos;

(e) Discussão dos resultados, tanto do ponto de vista científico-tecnológico, como do ponto de vista prático, no dia-a-dia da operação da mina;

(f) Conclusões e sugestões para continuidade do trabalho;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistema de informações integradas ERP-CVM

Um Sistema de Informação pode ser definido como um conjunto de componentes inter-relacionados que coleta (ou recupera), processa, armazena e distribui informação para dar suporte à tomada de decisão e ao controle da organização. Além de apoiar, coordenar e controlar a tomada de decisão, os sistemas de informação também podem ajudar os gerentes e trabalhadores a analisar problemas, visualizar assuntos complexos e criar novos produtos (De Tomi; Ceotto, 2002).

Os Sistemas de Informação servem de base para os sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*), que são sistemas de planejamento de recursos que procuram integrar cada departamento da área administrativa da mina, tais como:

(a) Valores econômicos de lavra;
(b) Custos de mina;
(c) Especificações pedidas pelos clientes;
(d) Satisfação dos clientes;
(e) Consulta a base de dados de custos de mão de obra e treinamento.

A integração destas tarefas faz com que toda a informação esteja vinculada e centralizada, tornando os dados mais confiáveis e dinâmicos e facilitando a tomada de decisão.

De acordo com Haberkorn (1999), o surgimento do ERP surgiu com a evolução do sistema de planejamento das necessidades de materiais *(Material Requeriment Planning* – MRP) acrescido às funções dos sistemas de planejamento de recursos de manufatura (*Manufacturing Resource Planning* – MRPII) sendo por fim integrados com os processos financeiros, fiscais e de recursos humanos. Esta integração permitiu que os sistemas ERP controlassem a aquisição de matéria prima, o processamento de fabricação de produtos de alta qualidade e sua entrega, tudo de maneira rápida e econômica.

A Figura 1 ilustra de forma resumida as principais etapas na produção de bens minerais, bem como a localização dos componentes *wireless* dentro da cadeia produtiva mineral:

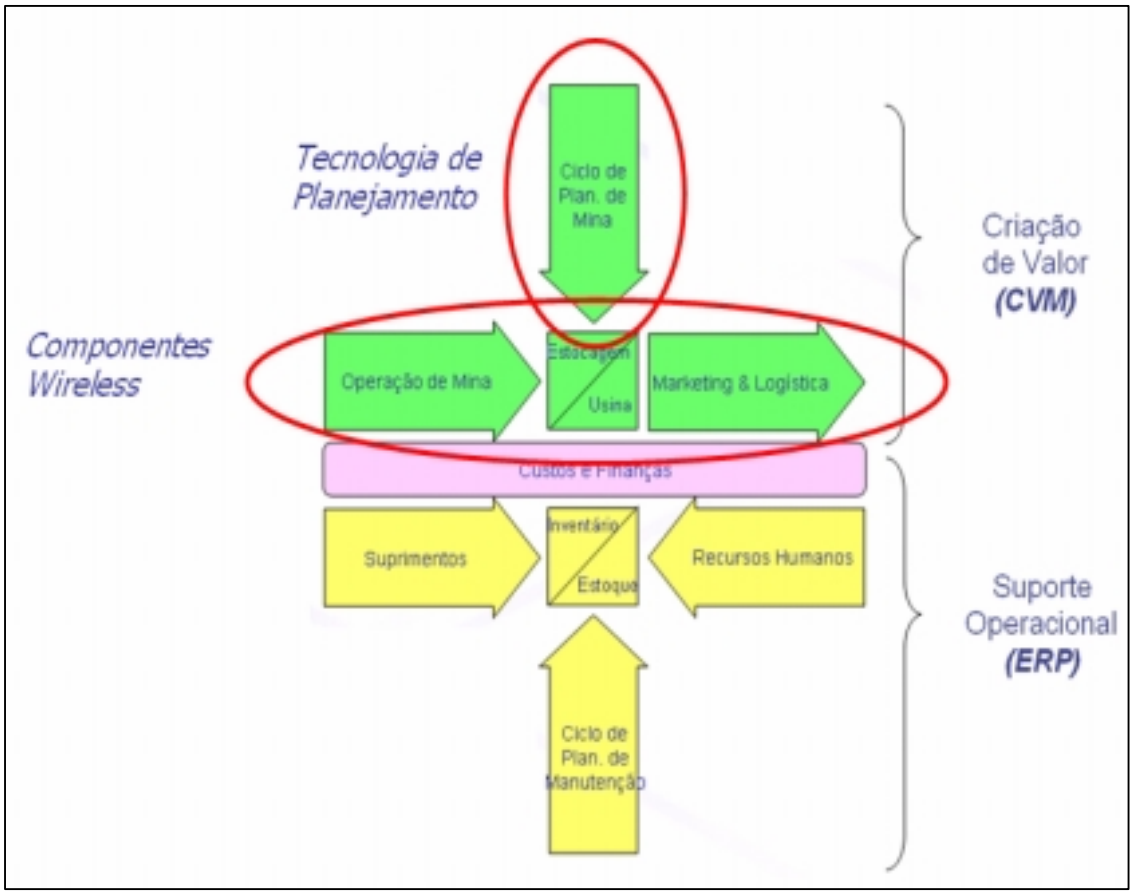


Figura 1. A Cadeia de Valor Mineral, modificado de De Tomi e Ceotto (2002).

O componente horizontal da porção superior do diagrama da Figura 1 (cor verde) se refere à seqüência das etapas na produção, partindo do desmonte e passando pelo transporte, estocagem, usina, venda e logística de entrega. O componente vertical da porção superior representa a contribuição intelectual deste processo, onde são tomadas decisões a respeito das diversas etapas seqüenciais de produção mineral.

A porção inferior do diagrama apresentado na Figura 1 (cor amarela) representa as inter-relações supervisadas por sistemas de gestão do tipo ERP. A porção superior do diagrama representa a Cadeia de Valor Mineral – CVM, pois é nesta área aonde é gerado o valor no negócio mineração (De Tomi; Ceotto, 2002).

A tecnologia *wireless* se localiza nas operações físicas de lavra (desmonte, carregamento, transporte, estocagem, etc.), uma vez que estas não possibilitam a troca de informações em tempo real por meios de conexões convencionais (redes físicas com cabos de conexão).

O uso da tecnologia *wireless* proporciona melhorias na qualidade e na produtividade das operações. Através da tecnologia *wireless*, o operador de máquina pode se orientar baseado num plano de lavra dinâmico, que pode ser atualizado à medida que novas informações são inseridas ao processo.

Para um maior proveito do uso da tecnologia *wireless* na mineração, se faz necessária a busca por alternativas na aplicação de técnicas que permitam melhorias no controle da qualidade do minério lavrado.

Uma alternativa para o aprimoramento no controle de qualidade do minério pode ser obtida através do uso de um modelo de blocos que confira ao plano de lavra uma medida da variabilidade local do modelo, através da incorporação da incerteza associada a esta modelagem e, por conseguinte, a tomada de decisão.

As técnicas de simulação condicional são amplamente utilizadas na indústria mineira para diversas finalidades, sendo que nesta dissertação elas se apresentam como uma alternativa para a modelagem da incerteza associada à diluição e perda de minério nas operações de decapeamento de mina.

2.2. Simulação geoestatística condicional

Segundo Deutsch e Journel (1998) a simulação estocástica é o processo de construir realizações igualmente prováveis das variáveis aleatórias componentes de um modelo de funções aleatórias.

Em cada uma dessas realizações, também conhecidas como imagens estocásticas, as propriedades impostas no modelo de função aleatória devem refletir. As simulações podem ser ditas condicionais quando assumem nos pontos amostrais os mesmos valores que aqueles observados. Desta forma, um modelo gerado através de simulação condicional é dito condicionalmente simulado se ele honrar os valores nos pontos amostrados e reproduzir as mesmas características da dispersão dos dados originais, isto é, a média, a variância e a covariância, através dos variogramas.

Uma série de modelos simulados do depósito pode representar ou capturar a incerteza sobre a descrição do verdadeiro depósito mineral, e desta forma a incerteza associada às estimativas pode ser avaliada. A simulação seqüencial gaussiana é a aplicação dos princípios da simulação seqüencial para função aleatória com distribuição gaussiana.

Segundo Journel & Huijbregts (1978), os objetivos da simulação e estimativa são, normalmente, incompatíveis. Como mostra a Figura 2, e mesmo que a curva dos valores estimados $Z^*(x)$ seja, em média, mais próxima da curva real $Z_0(x)$, a curva de valores simulados $Z^*_{sc}(x)$ representa melhor as flutuações da curva real.

Desta forma, a curva dos valores estimados é preferível para alocação e estimativa de reservas, enquanto que a curva de simulação é preferível para estudo da dispersão das características destas reservas.

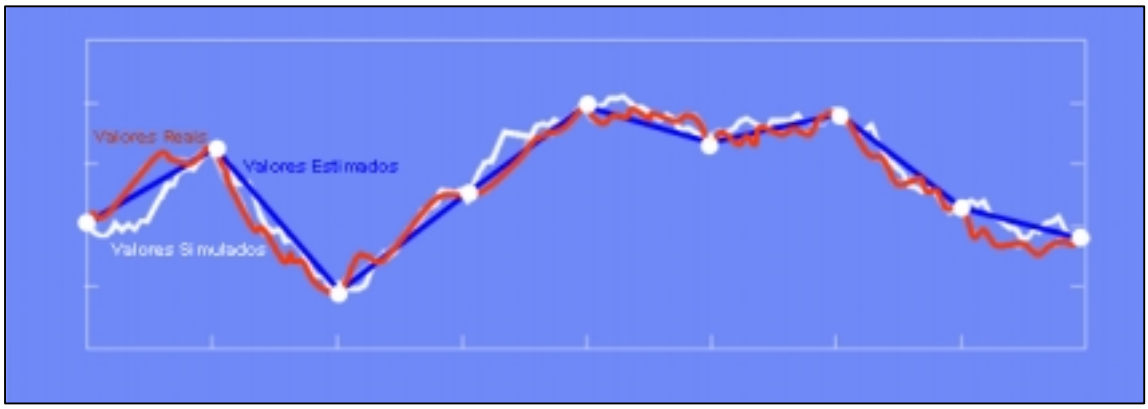


Figura 2. Curvas de valores estimados por krigagem e simulados condicionalmente comparadas com a curva dos valores reais. Gráfico modificado de Chilès & Delfiner (1999).

De acordo com Gambin (2003), tradicionalmente, a operação de controle de teores e planejamento de lavra é feita utilizando-se um modelo de blocos gerado por um estimador tradicional, geralmente krigagem ordinária de blocos, o qual realiza a

melhor estimativa (não tendenciosa e com variância do erro minimizada), a partir das amostras disponíveis.

No entanto, esse procedimento é incapaz de incorporar a incerteza associada à estimativa, pois segundo Olea (1991) a variabilidade dos valores estimados é menor que a variabilidade dos dados originais.

A Figura 3 ilustra que diferentemente da krigagem, os métodos de simulação geoestatística têm como objetivo reproduzir a variabilidade local e a variância espacial dos dados originais pela geração de imagens equiprováveis. Desse modo, a incerteza associada às estimativas pode ser avaliada, Goovaerts (1997).

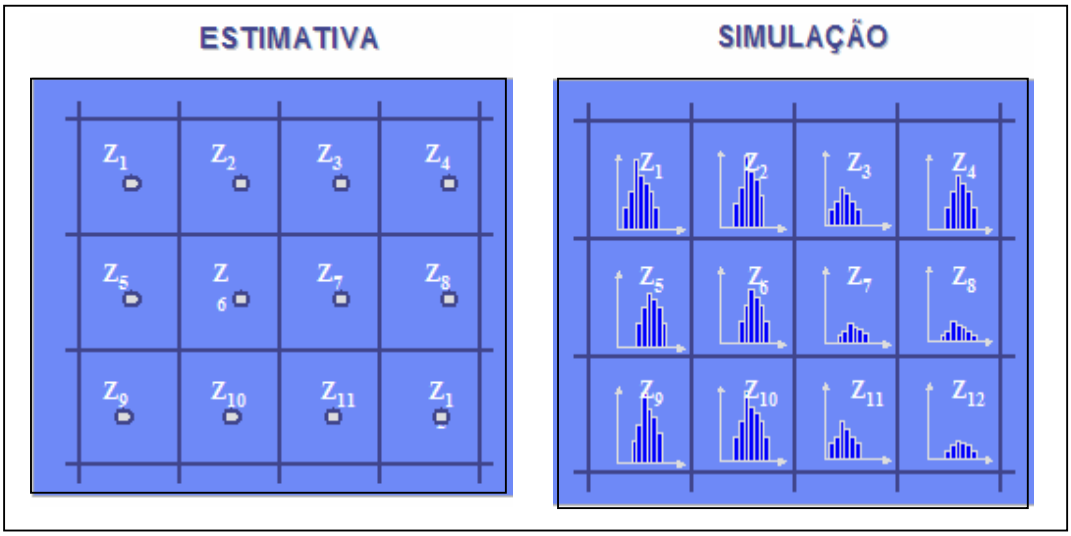


Figura 3. Gráficos mostrando os diferentes resultados da krigagem e da simulação condicional, gráfico modificado de Gambin (2003).

2.3. Tecnologia *wireless* na mineração

A incorporação de componentes tecnológicos *wireless* permite a transmissão de dados em tempo real entre equipamentos e escritórios, proporcionando melhorias na produtividade, na eficiência e no controle dos processos (Caterpillar, 1999).

Com isso muitas companhias mineiras têm investido fortemente em tecnologia para comunicação e troca de informações entre máquinas móveis (caminhões, carregadeiras, tratores, etc.) e escritório, objetivando ganhar mais mobilidade através do acesso em tempo real das informações de forma remota e, conseqüentemente, melhorar os processos produtivos e administrativos da empresa (Sousa; De Tomi, 2004).

Este avanço tecnológico nos processos mineiros tem ocorrido principalmente em face às condições dinâmicas e muitas vezes adversas encontradas na mineração, aonde o uso de cabos de conexão torna-se inviável, corroborando a idéia de que neste ambiente a tecnologia *wireless* é a alternativa mais eficiente.

Um exemplo de aplicação deste tipo de tecnologia ocorre na maior mina a céu aberto do mundo. A mina de Chuquicamata no Chile que possui uma produção diária de 280.000 toneladas de material. O transporte deste material é realizado por gigantescos caminhões fora-de-estrada de 100, 120 e 170 toneladas, segundo (http://www.educarchile.cl/eduteca/todounmundo/02/chuqui/guia.htm).

Carless (2004) destaca que devido à magnitude destes números, é de fundamental importância que os caminhões sejam mantidos sob condições ótimas todo o tempo, de maneira que eles possam ser utilizados no momento exato em que forem requisitados. Embora essa meta fosse almejada há muito tempo, o objetivo só foi alcançado mediante o uso de tecnologia *wireless,* a qual permitiu o monitoramento em tempo real dos caminhões, evitando grandes paradas para manutenção e,

conseqüentemente, propiciando um aproveitamento maior dos recursos materiais disponíveis.

Um outro exemplo da aplicação de tecnologia *wireless* é o sistema computadorizado de terraplanagem da Caterpillar *CAES (Computer Aided Earthmoving System).* Através do uso de tecnologia *wireless*, este sistema transmite os dados via satélite através do uso de GPS e de uma estação de rádio como dispositivo automático de entrada de dados, na busca de uma operação mais eficiente e produtiva (Caterpillar, 1999). A Figura 4 mostra um esquema típico de transmissão de dados via *GPS*:

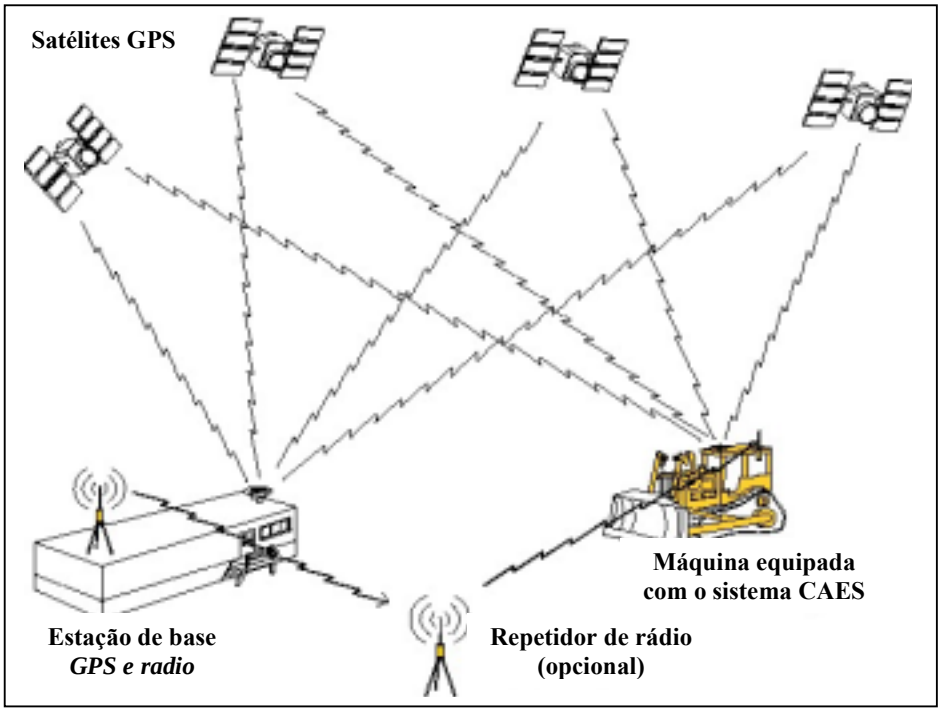


Figura 4. Esquema mostrando transmissão de dados via GPS, modificado de Caterpillar (1999).

Embora o objetivo desta tecnologia fosse apenas aumentar a eficiência dos equipamentos e eliminar a marcação manual do terreno através do uso de estacas e bandeirolas, ela tem hoje como uma das principais aplicações o controle de qualidade do minério lavrado por meio de uma maior precisão no corte executado pelos equipamentos de lavra.

3. METODOLOGIA

Uma consideração fundamental para a implementação de uma metodologia é a compreensão clara de como uma empresa põe em prática o seu ciclo de planejamento de lavra. Para isso, é necessário elaborar um modelo descritivo do ciclo de planejamento de todo o processo mineiro (De Tomi, 2004).

Ao invés de se considerar a inter-relação entre os setores do processo produtivo mineiro de forma individual, procura-se estabelecer aqui um sistema de gerenciamento de informação e produção, que busca a integração dos processos de forma harmoniosa, unidos por um objetivo comum. Esse tipo de integração necessita de uma sobreposição (ou interseção) entre os setores acima mencionados, de forma que a tomada de decisões de processo possa ser executada segura e eficientemente, já que o ambiente de decisão compreende seus diversos domínios envolvidos.

O desenvolvimento de uma metodologia para gerenciamento do fluxo de informações técnico-gerenciais para o setor mineral requer um correto mapeamento das atividades envolvidas no processamento mineral. Para tal fim, foi utilizado aqui o sistema IDEF0.

IDEF0 é sigla para "*Integration DEFinition method zero*", esta ferramenta foi desenvolvida para modelar as decisões, ações e atividades de uma organização ou sistema. O IDEF0 é derivado de uma conceituada linguagem gráfica, a SADT – *Structured Analysis and Design Technique* (KBS Inc, 2003).

Ainda de acordo com De Tomi (2004), o modelo do ciclo de planejamento de todo o processo da mina pode ser estruturado a partir de textos e diagramas de fluxo de processo, mostrando dessa forma como cada área desenvolve suas atividades, de maneira que seja visivelmente claro, para todos os envolvidos no processo, as respostas para as seguintes questões:

(a) Quais atividades são executadas, e por quem?

(b) Quais são os parâmetros de controle destas atividades?

(c) Onde e como as ferramentas disponíveis são aplicadas?

Desta forma, esse modelo visa funcionar como uma ferramenta de análise e de comunicação, de definição de papéis, de demonstração das inter-relações, de facilitação de solução de problemas, de identificação de oportunidades de melhorias e provedora de uma documentação concisa sobre o processo.

Na Figura 5 este modelo é apresentado de forma mais geral, onde a caixa central representa a atividade a ser desenvolvida; a seta da esquerda representa a entrada ou alimentação para a atividade; a seta da direita representa a saída ou produto da atividade; a seta de baixo representa o mecanismo que realizará a atividade em questão; e a seta de cima representa o controle necessário para atividade a ser desenvolvida (Heather et al., 2005).

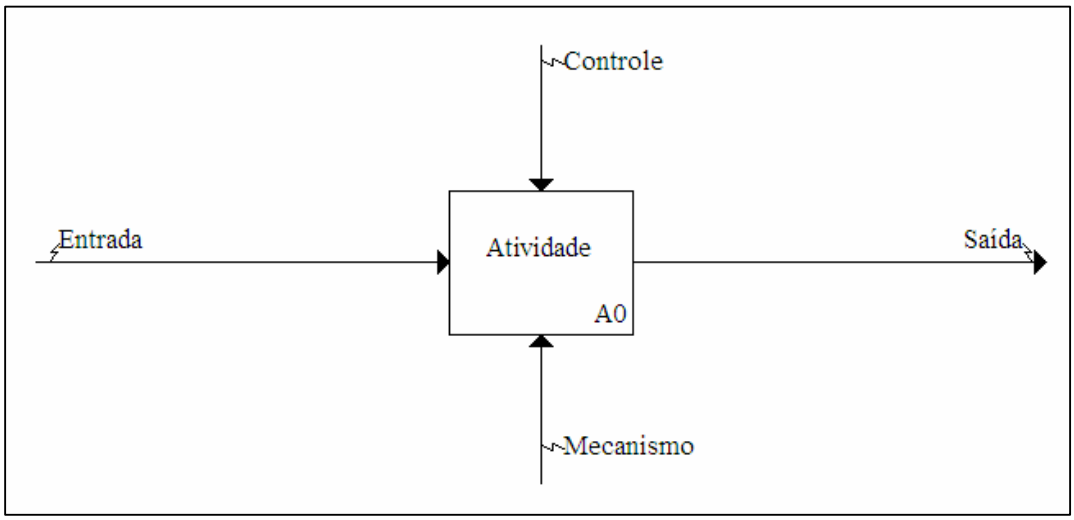


Figura 5. Estrutura genérica do sistema IDEF0, De Tomi (2004).

Conforme mostrado na Figura 6 abaixo, um modelo IDEF0 é uma série hierárquica de diagramas que permite detalhar tanto quanto for necessária a atividade modelada, permitindo que se concentre em um esquema de atividades de cada vez, sem, entretanto, se perder o foco na visão global.

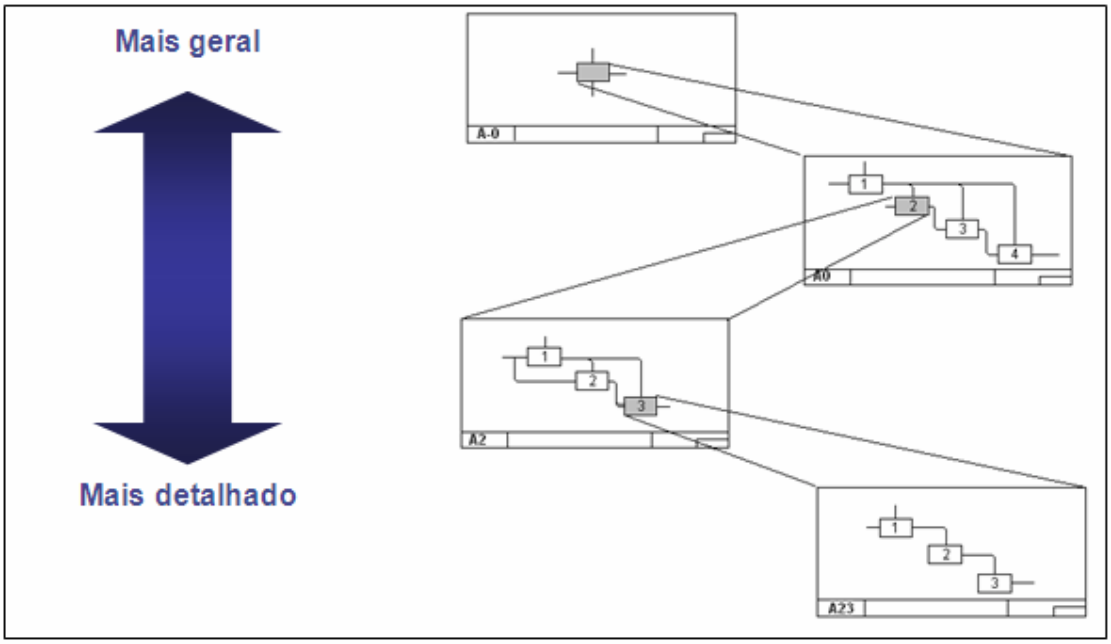


Figura 6. Níveis de informação no sistema IDEF0, De Tomi (2004).

A construção do modelo de atividade deve ser iniciada a partir da visão mais geral possível A0, seguida pelo detalhamento hierarquizado desta atividade. Caso não se consiga atingir o nível de detalhamento pretendido, procede-se decompondo a caixa A0 em outras atividades. Cada atividade pode ser subdividida em atividades cada vez menores e, conseqüentemente, melhor detalhada.

Ao final tem-se um mapeamento completo de todas as atividades detalhadas no sistema (Figura 6), bem como sua posição no processo, lugar em que a mesma é realizada, como é controlada e o que ela entrega como resultado.

Os modelos gráficos são finalmente convertidos para uma estrutura de dados (XML - *Extensible Markup Language*) e em seguida são carregados em um *software* de gerenciamento de informação (Figuras 7 e 8).

Figura 7. Conversão de arquivos para *software* de gerenciamento de dados, De Tomi (2004).

A XML é uma linguagem de marcação de uso geral que serve para criar linguagens de marcação de uso específico capaz de descrever vários tipos diferentes de dados. A sua função principal é de facilitar o compartilhamento de dados através de vários sistemas, particularmente sistemas ligados através da Internet.

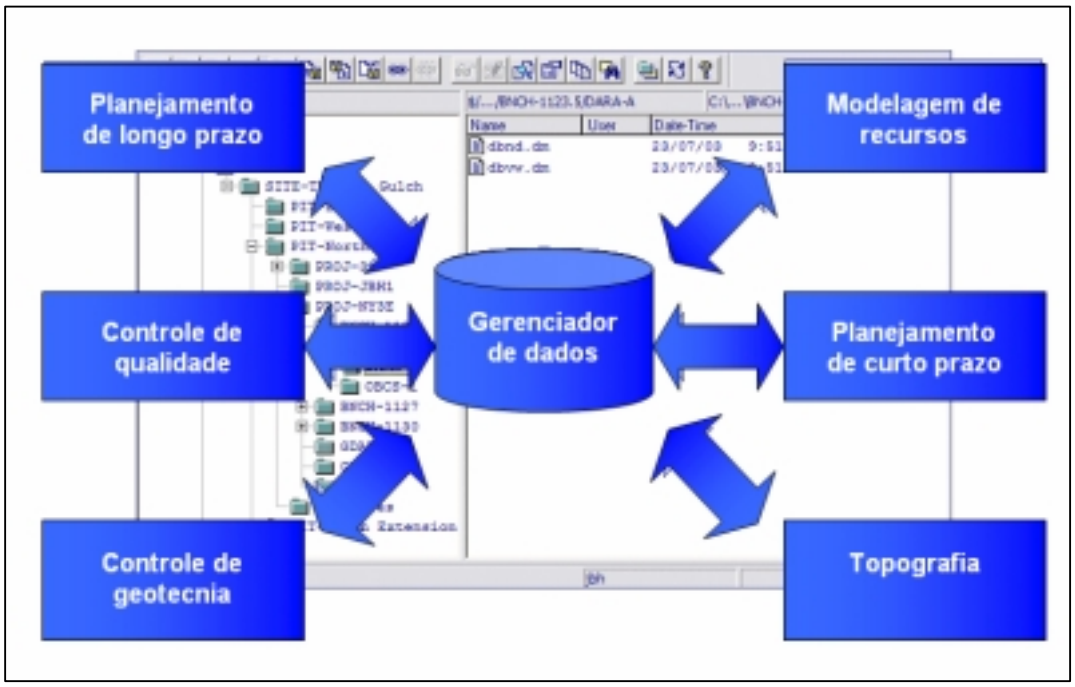


Figura 8. Diagrama mostrando o gerenciamento da informação de forma integrada, De Tomi (2004).

Um sistema de gerenciamento de dados pode receber informações de produção de diversos outros *software*. Porém tal informação deve ser cuidadosamente verificada. O mapeamento IDEF0 serve dessa forma como um excelente guia para identificar tais informações, assim como os processos que a geraram.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Definição do problema

O método de lavra em tiras conhecido como *strip-mining* é um método amplamente aplicado na mineração para lavra de jazidas tabulares, com pouca cobertura de estéril, onde o minério é extraído de uma só vez, permitindo o aterro e a recuperação da parte escavada imediatamente após a lavra.

Figura 9. Método de lavra em tiras aplicado geralmente em depósitos tabulares não profundos, foto cedida pela Mineração Rio Capim Caulim, Grupo Imerys (2005).

De acordo com Gatti e Barros (2003), as operações de lavra desenvolvidas em uma mina que utiliza o método de lavra em tiras são basicamente: desmatamento, decapeamento, desmonte mecânico, escavação e carregamento, transporte e recuperação das áreas lavradas (reflorestamento).

A Figura 10 mostra as operações desenvolvidas no método de lavra em tiras esquematizadas em forma de fluxograma de atividades através do uso do sistema IDEF0.

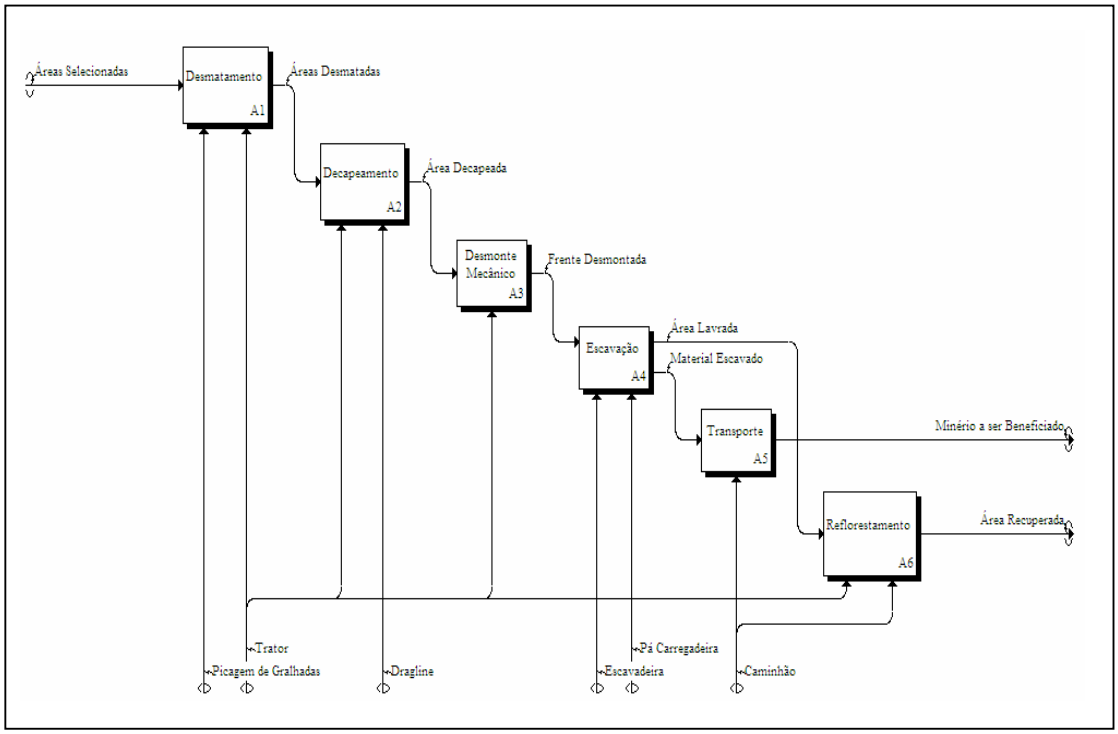


Figura 10. Modelo atual das operações de lavra mediante o uso do método de lavra em tiras, modificado de Gatti e Barros (2003).

Ao se analisar o caso particular de uma mina que tem sua lavra extremamente dependente da operação sincronizada de decapeamento (muito comum em casos de minas que utilizam o método de lavra em tiras) percebe-se que, na maioria das vezes, existem informações importantes que deveriam estar presentes de forma simples e clara no plano de lavra elaborado, mas que geralmente não são disponibilizadas para a equipe de planejamento no momento de tomada de decisões operacionais.

As informações contidas em um plano de liberação de minério (decapeamento) devem responder algumas importantes e operacionais questões, tais como:

(a) Em qual cota o operador do equipamento deve realizar o corte no capeamento (decapeamento) a fim de reduzir a diluição e as perdas de minério?

(b) Qual o nível de confiança contido no plano operacional de lavra para que a superfície cortada permita que as metas de qualidade do minério remanescente ao corte sejam cumpridas (parâmetros de qualidade do minério)?

(c) Quais são os desvios de qualidade no minério esperados num corte em determinada área da mina?

Tais informações são essenciais para a equipe planejamento de lavra, pois torna possível se antecipar as variações do minério a ser utilizado no beneficiamento, orientando a lavra da maneira mais racional e segura, e conseqüentemente, melhorando o gerenciamento dos riscos envolvidos na tomada de decisões.

Com estas informações é possível, por exemplo, a verificação de áreas com alto nível de incerteza na definição da cota de contato da superfície capeamento-minério, permitindo orientar a alocação de amostras adicionais a fim de diminuir a incerteza associada ao plano operacional de lavra.

A fim de responder às questões apresentadas anteriormente, é proposta aqui uma metodologia de integração de tecnologias que forneça um plano operacional de lavra

(superfície de corte) baseado num modelo da incerteza geológica associada à superfície de contato, transmitido de forma rápida e segura à equipe responsável pela operação da mina. A seguir são apresentadas algumas informações sobre a área de estudo piloto, bem como informações gerais sobre a Empresa que nela atua.

4.2. Empresa e histórico

A Mineração Rio do Norte S.A. (MRN), localizada no município de Oriximiná, Estado do Pará, foi criada em 1967 para extrair, beneficiar, e comercializar bauxita metalúrgica da região do Rio Trombetas. A MRN possui participação acionária das seguintes empresas: Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), BHP Billiton, Alcan Alumínio do Brasil Ltda. (ALCAN), Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), Alcoa Brasil, Alcoa World Alumina, Norsk Hydro, Abalco S.A.

Figura 11. Mapa de localização da área de estudo, modificado de Gatti e Barros (2003).

A MRN tem atualmente a maior mina de bauxita do mundo e está situada no oeste do Pará, às margens do rio Trombetas. A produção anual em 2003 foi de 14,5 milhões de toneladas de produto para embarque, isto corresponde a um total de 23 milhões de metros cúbicos de estéril decapeado e 21 milhões de toneladas de ROM (*Run-of-Mine*) lavrados.

O primeiro embarque registrado de bauxita da MRN ocorreu em agosto de 1979 e, até o ano de 2003, já foram lavrados cerca de 195 milhões de toneladas de bauxita bruta, gerando uma produção de aproximadamente 140 milhões de toneladas de bauxita beneficiada, segundo Gatti e Barros (2003).

O produto da MRN é embarcado em navios de até 65.000 toneladas, onde 60% é vendido para o mercado interno e 40% é exportado. O método de lavra utilizado em todas as minas da MRN é a lavra em tiras que, como dito antes, utiliza a área de uma faixa anteriormente lavrada como depósito para o material estéril decapeado da faixa seguinte.

4.3. Aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos

A região de estudo é quase totalmente recoberta por floresta densa, assumindo inúmeras variações de porte e composição, de acordo com a fisiografia, solos e teor de umidade.

Entre essas feições ou subtipos, destacam-se: 1) floresta densa dos platôs (altos e baixos) ao longo das margens do baixo curso do Rio Trombetas; 2) floresta densa

submontana em relevo aplainado, e em platô e relevo dissecado do Complexo Guianense; 3) floresta densa das baixas cadeias de montanhas (http://www.governodopara.pa.gov.br/conhecaopara/oriximina1.asp).

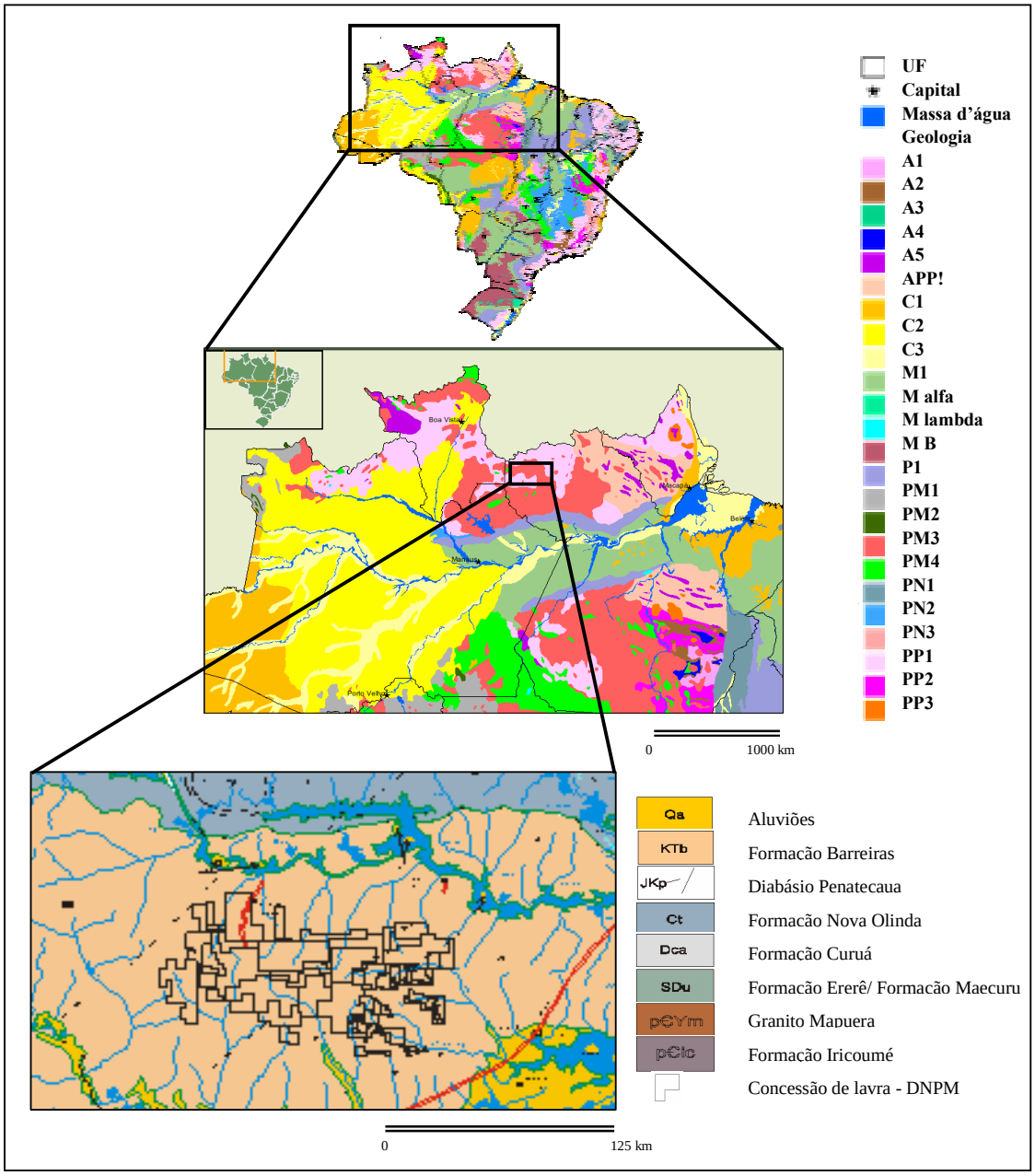


Figura 12. Mapa geológico local da área de estudo. Modificado de Gatti e Barros (2003).

A estruturação geológica da área é bastante complexa, apresentando duas províncias geológicas bem diferenciadas. Na primeira, ao norte do município de

Oriximiná estão expostas rochas de idade pré-cambrianas, que constituem: o Complexo Guianense, de natureza granito-gnáissico-migmatítica; o Grupo Iricoumé (riolitos, dacitos e andesitos); o Granito Mapuera (granitos e micro-granitos), e manchas eventuais de rochas básicas e sieníticas.

A segunda província, de natureza predominantemente sedimentar, apresenta rochas de idades paleozóicas, componentes da Bacia do Amazonas: o Grupo Urupadi com as Formações Trombetas, Maecuru e Ererê; a Formação Curuá e o Grupo Tapajós com as Formações Monte Alegre, Itaituba e Nova Olinda, unidades mesozóicas (Diabásio Penatecaua) e cenozóica, representadas pela Formação Barreiras e aluviões sub-atuais e recentes.

Morfoestruturalmente, suas formas de relevo estão inseridas nas unidades: Planalto Dissecado Rio Trombetas - Rio Negro, Planalto Rebaixado da Amazônia (do médio Amazonas); Depressão Periférica do Norte do Pará, Planalto da Bacia Sedimentar do Amazonas e Planalto Dissecado Norte da Amazônia.

O principal Rio desta área é o Rio Trombetas, que nasce ao norte do município de Oriximiná e cujos formadores são os Rios Poana e Anamu, este, por sua vez, sendo formado pelos Rios Curiau e Maná. O Rio Poana tem como seu mais importante afluente, o Cafuini. O Rio Trombetas percorre de norte para o sul e segue para sudeste desaguando no Rio Amazonas.

4.4. Processo de formação da Bauxita

Segundo Gatti e Barros (2003), a bauxita encontrada na região do Rio Trombetas foi formada por um processo de decomposição de rochas sedimentares aluminosas, composta de sedimentos argilosos e arenosos.

Estudos indicam que no início da formação do depósito ocorreu a oxidação e hidratação dos silicatos de alumínio formando oxi-hidróxidos de alumínio. A sílica livre foi lixiviada juntamente com outros elementos mais solúveis, resultando numa concentração residual de óxidos hidratados de alumínio (gipsita e boemita) e de óxidos de ferro (hematita, goetita e alumino-goetita).

A bauxita ocorre em camadas tabulares de grande extensão longitudinal no topo de platôs, que possuem um desnível em relação às áreas subjacentes de até 200 metros (Gatti; Barros, 2003).

A formação da bauxita é fortemente influenciada pelos fatores de formação do solo, os quais segundo Zimback (2003) são eles: a) material de origem, b) clima, c) organismos, d) relevo, e e) tempo.

a) Material de origem

É o material que dá origem ao solo, podendo este ser constituído de rochas (magmáticas, metamórficas e sedimentares), sedimentos e material de decomposição de rochas transportadas.

Vários minerais constituintes do material de origem podem permanecer inalterados, enquanto outros podem sofrer decomposição por ação química transformando-se em minerais extremamente úteis no solo.

b) Clima

O clima assume uma importância muito grande uma vez que sendo o solo um produto do intemperismo do material de origem, ele apresenta propriedades e características diferenciadas em função de cada clima.

Desta forma solos formados sob clima tropical são solos bem intemperizados, enquanto aqueles formados sob clima temperado são bem menos intemperizados. Outro fato é que, quanto mais quente e úmido o clima, maior a lixiviação de minerais, inclusive de bases, tornando o solo mais pobre e mais ácido.

c) Organismos

Os organismos influenciam na formação do solo uma vez que eles além de serem fornecedores de matéria orgânica, também contribuem com determinados compostos orgânicos que podem promover diferenciação entre alguns solos.

d) Relevo

O relevo influencia o solo resultante condicionando a penetração de água no solo e com isso interfere na intensidade de intemperismo. Tem-se, por exemplo que, em

áreas planas, na parte alta do relevo ocorre penetração de grande quantidade de água com pequena formação de enxurrada, ocasionado uma lixiviação interna bastante grande, permitindo a formação de solos profundos, altamente intemperizados, bastante ácidos e pobres em nutrientes.

Em áreas com alto declive a penetração de água é menor, com formação de mais enxurrada e ocasionando uma lixiviação menos intensa, permitindo a formação de solos mais rasos, menos intemperizados, menos ácidos e com mais nutrientes.

Nas áreas de baixada ocorre ganho de material (sendo este ganho por meio da enxurrada ou através do lençol freático), sem ocorrência de lixiviação, formando solos rasos não muito intemperizados, porém não muito ácidos e normalmente ricos em nutrientes.

d) Tempo

O tempo também é um fator formador de solo uma vez que essa formação é resultado não somente de reações químicas como também da ação das forças físicas de atração de partículas que demandam tempo para se manifestarem.

Certas reações demandam mais tempo que outras, fazendo com que haja solos que demorem mais tempo para atingirem seu ponto de equilíbrio que outros.

Existem também alguns processos que influenciam no processo de formação de solos, sendo por isso este fenômeno um resultado da combinação de vários processos de formação, a saber: adição, perda, transporte e transformação.

(a) Adição: Diz respeito a tudo o que entra no corpo do solo, seja através da adição de compostos orgânicos, seja pela adição de componentes minerais, trazidos pela erosão ou pela água do lençol freático.

(b) Perda: Se refere a tudo o que sai do corpo do solo, seja pela erosão ou pelas queimadas (pela superfície), seja pela lixiviação (em profundidade).

(c) Transporte: Está associado a tudo o que é transportado dentro do corpo do solo por processos seletivos (migração de argila, etc.), ou por processos não seletivos (transporte por formigas, cupins, etc.).

(d) Transformação: Diz respeito à transformação sofrida pelos minerais constituintes do material de origem dando assim, origem aos minerais secundários. Isto ocorre principalmente aos minerais de argila, ou à transformação dos compostos orgânicos adicionados ao material durante a formação do solo.

4.5. Considerações sobre a operação de decapeamento de mina

Segundo Gatti e Barros (2003), o decapeamento da mina em estudo é realizado por uma frota de tratores Caterpillar D11R e uma *dragline* 680W Bucyrus. Estes equipamentos operam em faixas que possuem em média 30m de largura e até 1.700 metros de comprimento. A Figura 13 mostra uma fotografia aérea de uma das minas de bauxita da MRN:

Figura 13. Aspecto geral das operações de lavra de uma das minas da MRN, modificado de Gatti e Barros (2003).

A MRN possui uma grande frota de tratores D11R, sendo atualmente 16 unidades no total. Entretanto, no passado, quando a relação estéril-minério era menos favorável se chegou a um total de *20* unidades, sendo naquela ocasião a maior frota de tratores D11R do mundo. Por esse motivo não é difícil concluir que a operação dos tratores tem forte impacto no custo operacional da empresa.

Eles são usados na execução das operações de liberação de minério, desmonte mecânico, apoio a *dragline* e serviços de terraplanagem, tais como manutenção de acessos, rampas, estradas e praças.

Desta forma todo e qualquer esforço que busque um aprimoramento no desempenho dos tratores é detalhadamente estudado e avaliado pelo corpo técnico da mina, procurando assim uma melhoria contínua em suas operações.

Como complementação a uma série de outras alternativas que visam a melhoria das operações da mina, esta pesquisa concentrou esforços para definir um modelo de superfície que atendesse às necessidades da operação de decapeamento da mina, dentro de um aceitável nível de confiança no corte de lavra.

Para tanto, foram desenhados em um esquema IDEF0 o modelo atual e o modelo proposto para a operação de decapeamento de mina. Incorporou-se no modelo de atividades proposto, um modelo de blocos em três dimensões para a mina, o qual foi simulado condicionalmente, e que, por sua vez, traz consigo informações sobre o nível de confiança geológica que será transmitido à elaboração dos planos operacionais de lavra.

Segundo Stangler (2001), os depósitos simulados podem ser usados para vários propósitos na indústria mineira, dependendo de cada projeto. Desta forma, teores, espessuras e geometria de uma jazida podem ser simulados, medindo o grau de variabilidade/incerteza de cada aspecto em particular.

Tanto o modelo atual quanto o modelo proposto para as operações de decapeamento contidas no ciclo de planejamento das minas são mostrados a seguir. Esses modelos foram desenhados obedecendo ao fluxo de informações necessário

para realização desta atividade em todas as etapas, mantendo entre si a conexão lógica e hierárquica do processo (Figuras 14 e 15).

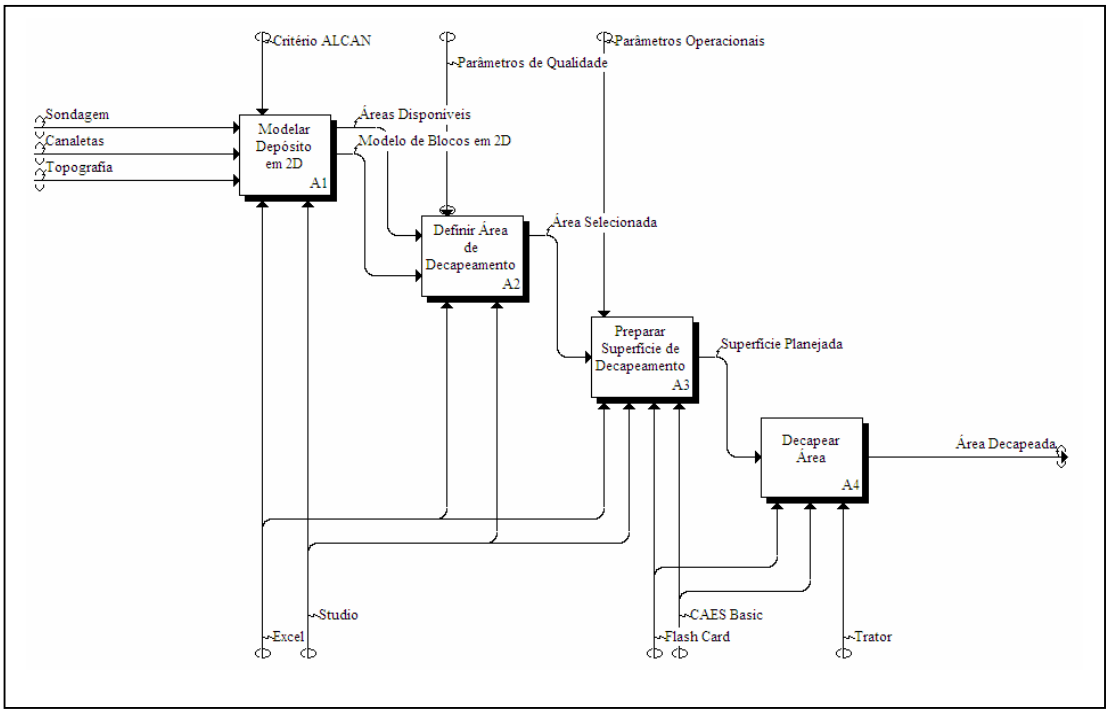


Figura 14. Modelo atual da atividade de decapeamento da mina, modificado de Gatti e Barros (2003).

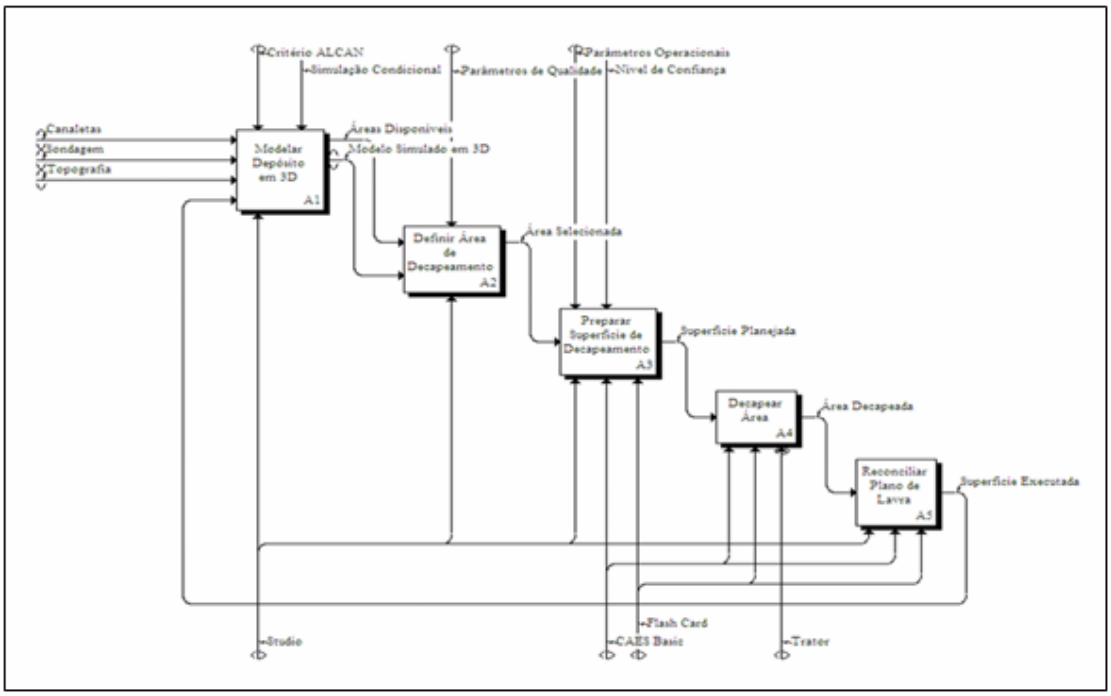


Figura 15. Modelo proposto para a atividade de decapeamento da mina.

4.5. Teste de tecnologia *wireless* nas operações de decapeamento

Estando entre os objetivos das empresas de mineração a minimização de seus custos operacionais através da maximização da eficiência operacional, há três anos atrás o corpo técnico da MRN começou a realizar alguns testes com ferramentas de transmissão de dados via componentes *wireless*, nas operações de decapeamento de suas minas, segundo (Gatti; Barros, 2003).

Algumas considerações sobre os resultados deste estudo são apresentadas a seguir, as quais corroboram as diretrizes metodológicas sugeridas nesta pesquisa.

No sistema tradicional de decapeamento de mina, o controle de qualidade da lavra é extremamente dependente da experiência dos técnicos de qualidade e dos operadores dos tratores da mina, os quais utilizam marcações topográficas com estacas e bandeirolas para realizar os serviços com qualidade e com máxima produtividade possível.

Para fins de análise, foi instalado em dois tratores da mina o sistema CAES da Caterpillar com o objetivo de medir os possíveis ganhos reais que um sistema de informação que se baseia em transmissão de dados por GPS de alta precisão pode proporcionar, quando comparado com o sistema tradicional.

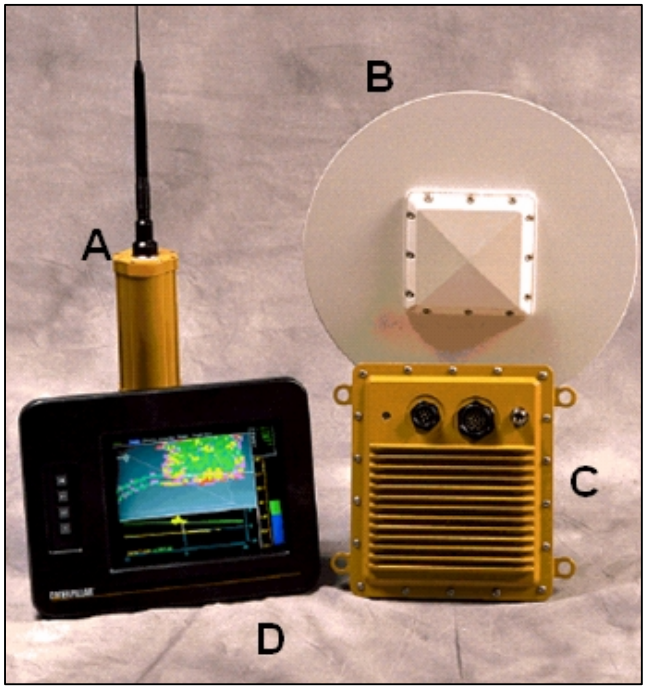


Figura 16. Sistema CAES instalado em dois tratores D11R na MRN, onde: A) transmissor de rádio; B) antena para leitura do terreno; C) receptor de dados GPS; D) computador de bordo embarcado nos tratores, Caterpillar (1999).

Segundo Gatti e Barros (2003), os tratores que executaram a tarefa de decapeamento e liberação do minério foram guiados pelo sistema CAES. De forma geral, o procedimento utilizado nos testes consistia na elaboração de um projeto de terraplanagem que em seguida era carregado no computador de bordo dos tratores, o qual continha a superfície a ser cortada e, consequentemente, o contato capeamento-minério.

Os operadores dos tratores foram então guiados com precisão no trabalho de corte do terreno, pois através do computador de bordo dentro da cabine da máquina era possível que o operador identificasse a posição relativa da lâmina do trator até a superfície planejada (Figura 17).

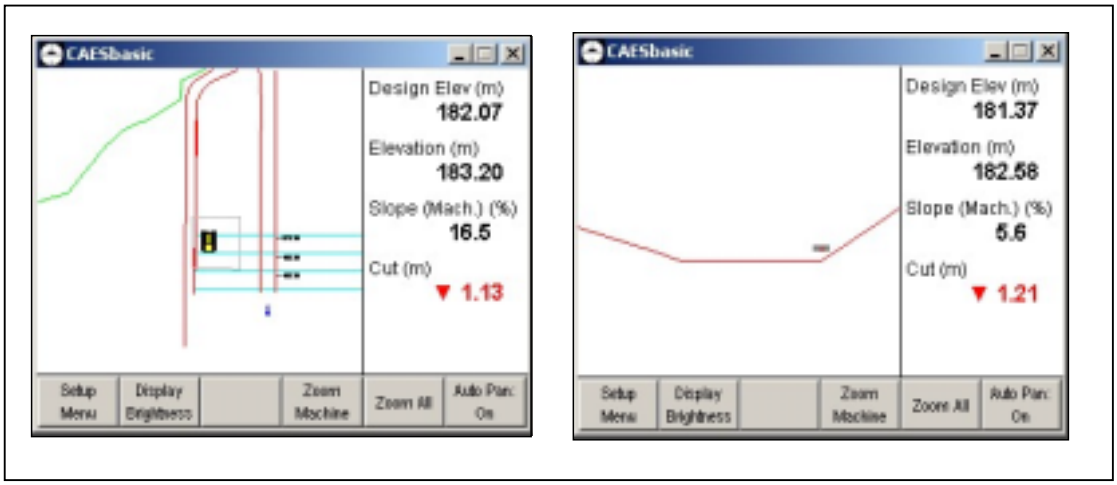


Figura 17. Computador de bordo embarcado nos tratores mostrando vistas do projeto, mapa de fundo, parâmetros operacionais e posição do trator em relação à superfície de corte, Gatti e Barros (2003).

Segundo os mesmos autores, o processo de definição das cotas de topo e base da camada de minério nas minas começa com uma amostragem das canaletas perpendicularmente ao corpo de minério, na posição das frentes de lavra. A partir das informações dessas análises, o pessoal responsável pelo controle de qualidade define a cota de topo e base do minério em cada amostra.

Figura 18. a) Litologia típica de um depósito tabular de bauxita no norte do Brasil e b) definição das superfícies que delimitam o minério, modificado de Gatti e Barros (2003).

Como apresentado na Figura 18, a cota de liberação do minério indica o material estéril a ser removido sobre a bauxita. Este material é constituído pela laterita e a parte superior da bauxita que não atende ao teor de corte.

Em seguida, a equipe do planejamento de curto prazo projeta as participações das frentes de lavra, de forma a atender as especificações de qualidade e de tonelagem da semana, dia e turno, obedecendo às capacidades operacionais da mina. É na operação de liberação e lavra do minério que é determinada a diluição, a contaminação e/ou a perda de minério, sendo estes definidos como:

(a) Diluição: é o material estéril lavrado como minério. Neste caso, o teor do metal de interesse (alumina aproveitável) é menor do que o teor de corte;

(b) Contaminação: é o material estéril lavrado como minério, onde a quantidade de elemento ou metal contaminante (sílica reativa) é maior do que o de teor de corte;

(c) Perdas: é o minério descartado como estéril.

A Figura 19 apresenta os conceitos de diluição e perdas ocorridos durante as operações de liberação de minério. Um ponto importante a ressaltar é que a contaminação se dá somente no contato minério-estéril.

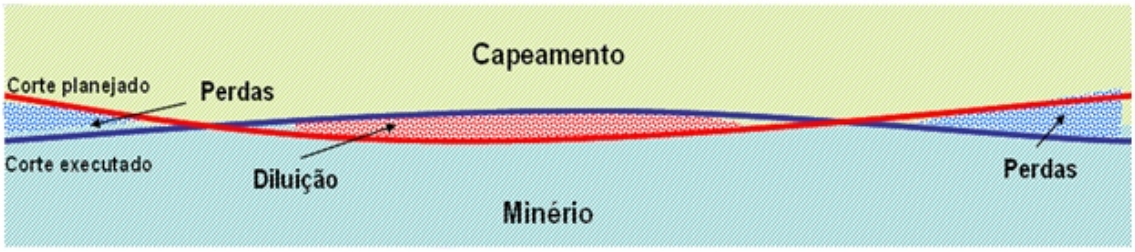


Figura 19. Diluição e perdas associadas às operações de decapeamento de mina.

Pelo procedimento descrito, se nota que tanto a liberação quanto a lavra de minério levam em consideração apenas as cotas dos contatos nas amostras, não sendo realizado nenhum estudo sobre o comportamento da camada de minério nas vizinhanças das canaletas e/ou furos.

Para administrar as variáveis acima mencionadas, é necessário um forte mecanismo de controle na execução deste processo, de forma que sejam atendidos os parâmetros de qualidade especificados. Como dito anteriormente, esta tarefa é realizada através da supervisão direta dos técnicos de qualidade e/ou pelos operadores, nas áreas onde está sendo realizada a liberação do minério.

Embora o modelo de superfície utilizado nos primeiros testes tenha sido gerado apenas baseado nas informações dos contatos capeamento-minério das amostras de curto prazo (admitindo-se que a superfície de contato entre essas canaletas apresenta um comportamento linear), os resultados obtidos já foram bem favoráveis apontando para um ganho nas operações da mina.

Nestes testes os ganhos de produtividade foram facilmente medidos através da produtividade horária. Entretanto, os ganhos quanto ao controle de qualidade foram mais subjetivos, devido tanto à dinâmica natural da lavra por tiras, quanto ao fato de não se ter feito um estudo de variabilidade da superfície de contato capeamento-minério.

Pelos motivos apresentados, a metodologia proposta aqui sugere o uso conjunto de aplicativos e técnicas integradas que forneçam às equipes planejamento e operação

não somente informações sobre a elevação da máquina em relação ao plano de lavra elaborado, mas também a informação do nível de incerteza associada ao plano de lavra operacional. Este uso proporciona uma avaliação do risco associado a cada cenário simulado.

Figura 20. Superfície simulada condicionalmente em *software* de modelagem geológica e planejamento de lavra, fornecendo a incerteza associada ao plano operacional.

No sistema proposto, as informações seriam repassadas para o operador da máquina em tempo real, e estas seriam visualizadas no computador de bordo embarcado no trator, permitindo um fluxo continuo e seguro de informações.

As páginas a seguir mostram em detalhe o estudo realizado para geração da superfície de contato capeamento-minério, mediante o uso de técnicas de simulação condicional.

4.6. Elaboração do modelo de superfície

A fim de se elaborar um modelo de que forneça um controle na qualidade no minério lavrado, e que confira ao plano de lavra uma medida da variabilidade local deste modelo, faz-se aqui o uso das técnicas de simulação condicional (Sousa; Arbieto; De Tomi, 2004). Neste sentido, é modelada a incerteza associada à diluição contida na superfície de contato capeamento-minério.

Para elaborar um modelo simulado condicionalmente é necessário o estudo geoestatístico das variáveis de interesse, aonde se medirá o comportamento espacial do fenômeno. As n simulações igualmente prováveis que serão geradas neste processo estarão condicionadas às características de primeira e segunda ordem dos dados originais.

Existem vários métodos para geração de modelos simulados, sendo que este estudo utilizou o método de simulações seqüenciais através de distribuições gaussianas, que serão detalhadas mais adiante.

A Figura 21 a seguir mostra um esquema da metodologia para geração, validação e uso dos modelos gerados através de simulação seqüencial gaussiana:

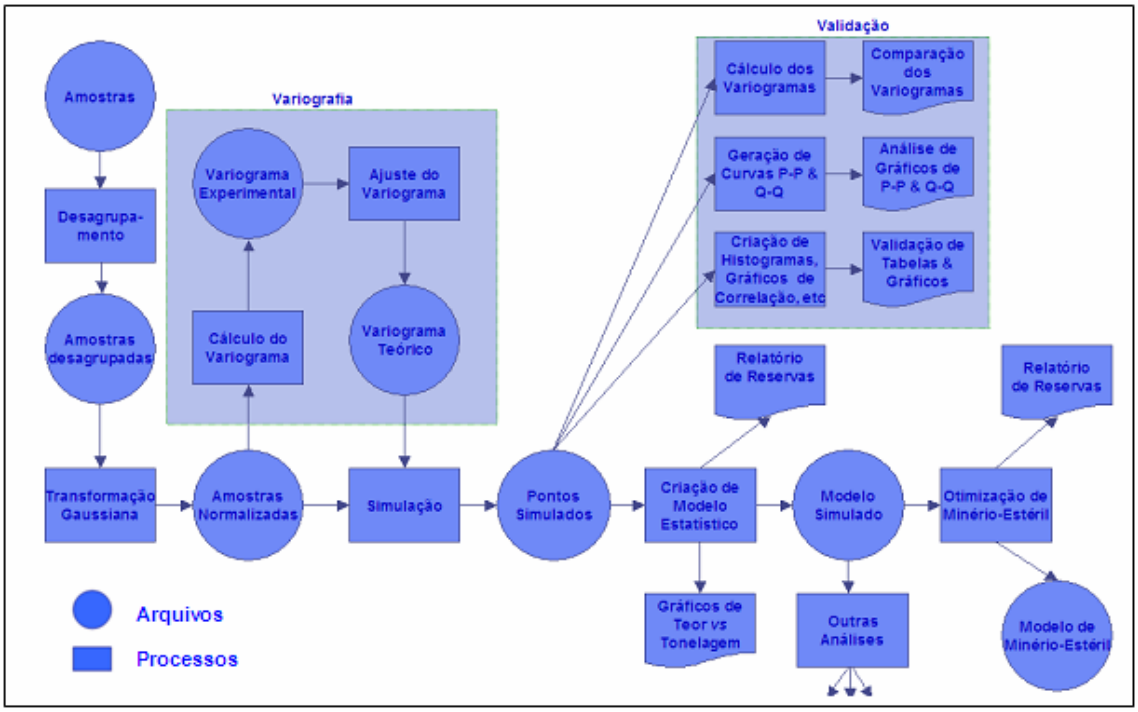


Figura 21. Esquema da metodologia para geração de modelos através de simulação seqüencial gaussiana. Modificado de Datamine (2004).

4.7 Analise exploratória dos dados

Antes de qualquer estudo de continuidade espacial e simulações resultantes, é essencial definir os limites geográficos do(s) domínio(s) a ser(em) considerado(s) apropriadamente. Da mesma forma é importante definir desde o início o tipo de abordagem a ser imposta, 2D ou 3D (bi ou tridimensional), determinando assim a maneira como a informação amostral será tratada. Essas etapas preliminares são indispensáveis, pois a partir delas são tomadas importantes decisões (Armstrong, 1998).

A base de dados deste estudo é composta por 213 furos de longo prazo e 1066 canaletas de curto prazo, totalizando 1279 amostras. Todas as amostras são

verticais, e estão classificadas de tal forma que é possível identificar nelas as tipologias correspondentes ao capeamento, ao minério e ao estéril de base.

Este trabalho se restringe a simular apenas os pontos dos contatos da superfície capeamento-minério numa abordagem bidimensional, o qual produzirá um modelo tridimensional através da geração da variável de terceira dimensão (coordenada vertical do ponto de contato da superfície citada).

A Figura 22 mostra a distância relativa, a partir da coordenada da boca do furo, dos pontos de contato superior (PT_TOP igual a 4,2 metros) da superfície capeamento-minério e do contato inferior (PT_BASE igual a 10,2 metros) da superfície minério-estéril de base ao longo do furo de sonda alm_dh2:

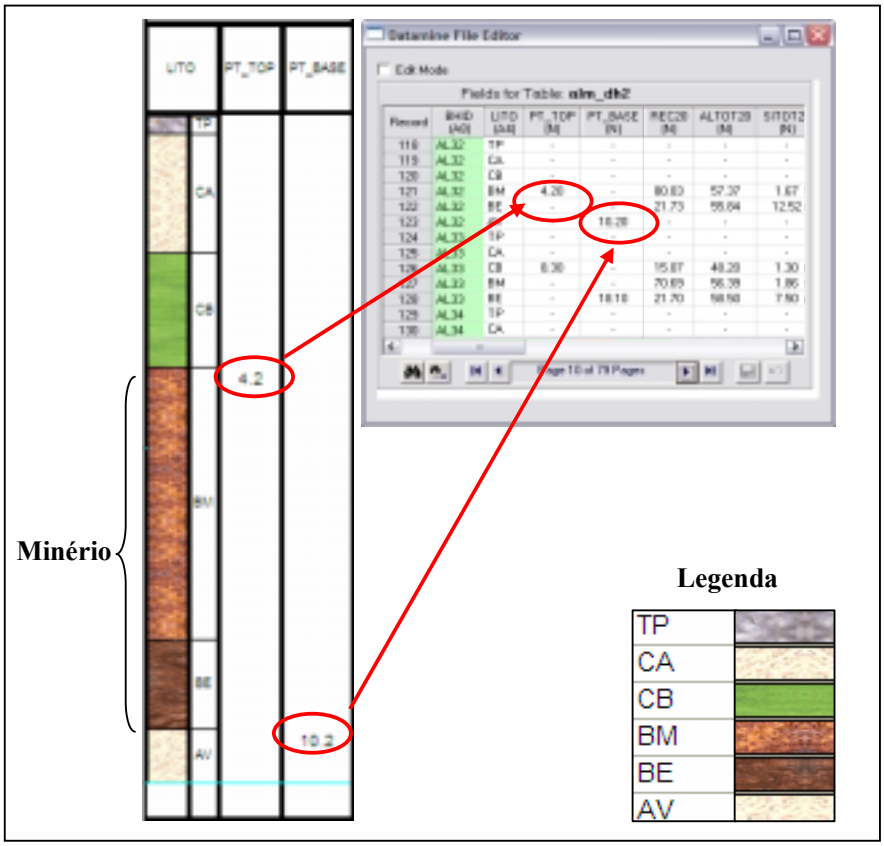


Figura 22. Pontos do contato superior e do contato inferior das superfícies que delimitam o minério no furo alm_dh2.

As amostras estão legendadas na Figura 22 segundo o campo *LITO*, o qual identifica a litologia de cada intervalo descrito como TP, CA, CB, BM, BE e AV, onde para a esta base de dados tem-se que:

(a) *TP* – Solo orgânico;

(b) *CA* – Argila amarela;

(c) *CB* – Laterita

(d) *BM* – Bauxita nodular;

(e) *BE* – Bauxita maciça e

(f) *AV* – Argila variegada.

Segundo Stangler (2001), para se realizar a simulação em blocos uma variável regionalizada deve ser aditiva. Em nosso estudo a variável PT_TOP (pontos do contato superior da superfície capeamento-minério) pode ser dita aditiva, uma vez que os seus valores médios num determinado volume ou área podem ser representados como a média aritmética de todos os n valores aí presentes, não sendo necessário fazer nenhuma ponderação sobre o seu comprimento ou volume.

Sendo a variável PT_TOP uma variável que corresponde a uma cota, é possível utilizar as informações dos pontos de contato dos furos e das canaletas conjuntamente uma vez que esta variável possui o mesmo suporte amostral.

4.8. Desagrupamento das amostras

Sabe-se que as estratégias de amostragem, por diferentes motivos, tendem a gerar zonas preferencialmente amostradas, principalmente quando as amostras não estão sobre uma amostragem regular. Desta forma, a amostragem é dita preferencial quando a localização dos dados não é nem regular nem aleatoriamente distribuída pela área de estudo (Isaaks; Srivastava, 1989).

É uma prática comum na mineração ter-se um número maior de amostras em uma determinada área. Entretanto, quando os dados não estão em uma malha regular o uso completo dos mesmos poderá produzir estimativas enviesadas da média, da variância e, conseqüentemente, do histograma (Journel, 1983).

Segundo Costa (2003), diversos fatores podem fazer com que algumas áreas sejam preferencialmente amostradas tais como: condições de acessibilidade, valores atribuídos esperados (ex: altos teores, concentração de metais, etc.), estratégia de amostragem, etc; e neste caso qualquer amostragem preferencial é passível de influenciar todos os resultados estatísticos dos dados.

Para corrigir esse desvio é sugerido um dos seguintes procedimentos: a) reter unicamente os dados regularmente espaçados ou b) atribuir pesos aos dados de modo a atenuar a influência do agrupamento dos dados causados pela amostragem preferencial.

O primeiro enfoque é apropriado para bancos de dados que tenham uma quantidade suficiente de informações para garantir confiabilidade para a inferência. Já quando os dados são esparsos e não permitem que sejam ignorados valores agrupados, é sugerido utilizar a segunda alternativa.

O desagrupamento é um processo de ajuste dos dados a fim de permitir uma maior representatividade das amostras. A Figura 23 mostra a distribuição espacial dos dados no depósito com três áreas preferencialmente amostradas.

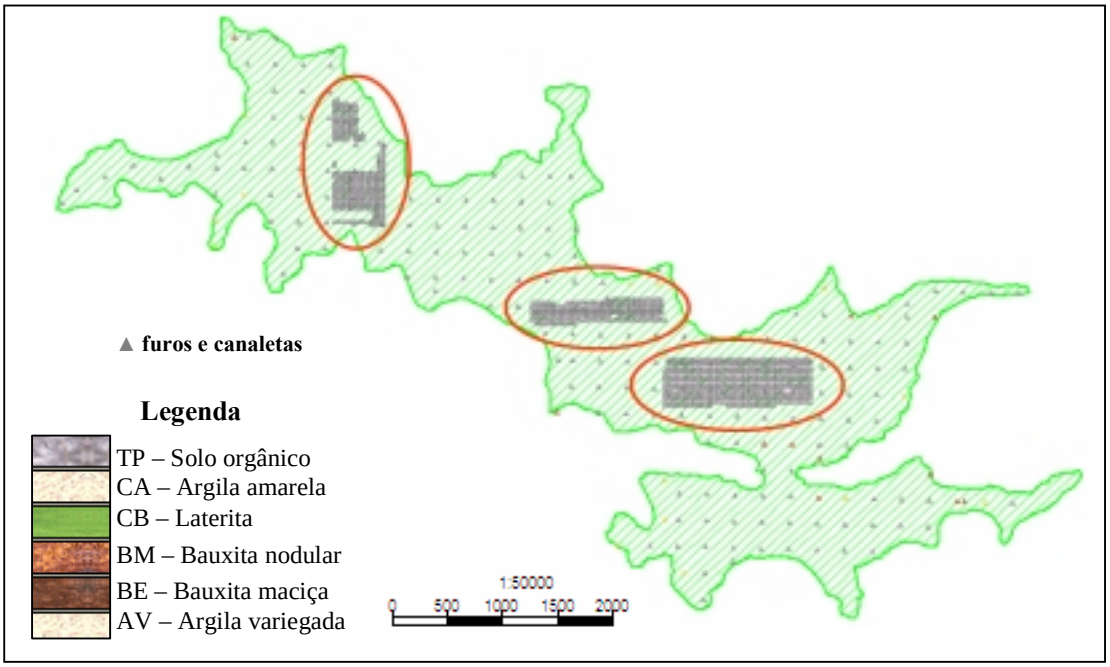


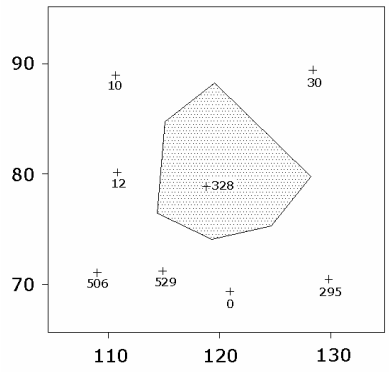
Figura 23. Mapa de localização das amostras utilizadas na mina bauxita em estudo.

A seguir se descreve brevemente dois métodos de desagrupamento de amostras, segundo Isaaks e Srivastava (1989), os quais fazem uso da combinação linear dos pesos de todas as amostras disponíveis para a determinação da média. Estes métodos são conhecidos como: a) método da poligonal e b) método das células móveis.

Ambos os métodos baseiam-se na premissa intuitiva de que dados em áreas mais densamente amostradas apresentam menores áreas de influência do que dados mais isolados. Isso confere a estes últimos pesos maiores no cálculo da distribuição estatística, pois supostamente são representativos de áreas maiores (Stangler, 2001).

a) Método da poligonal

O método da poligonal é um método de desagrupamento em que os pesos atribuídos às amostras são diretamente proporcionais à área do polígono de influência ao seu redor (Figura 24). Em zonas de dados agrupados, as áreas dos polígonos tendem a ser pequenas, recebendo, então, pesos menores, Isaaks e Srivastava, (1989).



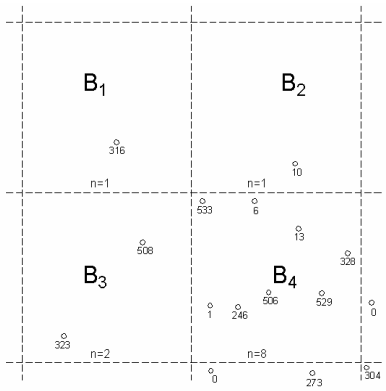
$$m = \frac{1}{A}\sum_{\alpha=1}^{n} \omega_{\alpha}.z(u_{\alpha}) \qquad (1)$$

Figura 24. Método da poligonal, modificado de Isaaks e Srivastava (1989).

Onde m é a média desagrupada dos dados, A é o somatório de todas as áreas dos polígonos, ω é a área do polígono centrado em u_{α} e $z(u_{\alpha})$ é o valor da variável resposta observado na amostra.

b) Método das células móveis

No método das células móveis a área total é dividida em regiões retangulares chamadas de células. Cada amostra recebe um peso inversamente proporcional ao número de amostras que caem dentro da mesma célula (Figura 25). Amostras agrupadas, de maneira geral, receberão pesos baixos com esse método, pois as células nas quais elas estão localizadas conterão diversas outras amostras (Isaaks; Srivastava, 1989).



$$\lambda_\alpha = \frac{1}{B.n} \qquad (2)$$

$$m = \sum_{\alpha=1}^{n} \lambda_\alpha . z(u_\alpha) \qquad (3)$$

Figura 25. Método das células móveis, modificado de Isaaks e Srivastava (1989).

Onde B é o número de células, n diz respeito ao número de dados em cada célula, λ_α é o peso das amostras, $z(u_\alpha)$ é o valor da variável resposta no ponto e m é a média desagrupada dos dados.

A Figura 26 mostra o histograma dos pontos do contato superior da superfície capeamento-minério PT_TOP com as amostras ainda agrupadas, e depois usando os pesos de desagrupamento. Neste trabalho foi utilizado o método das células móveis para o desagrupamento dos dados.

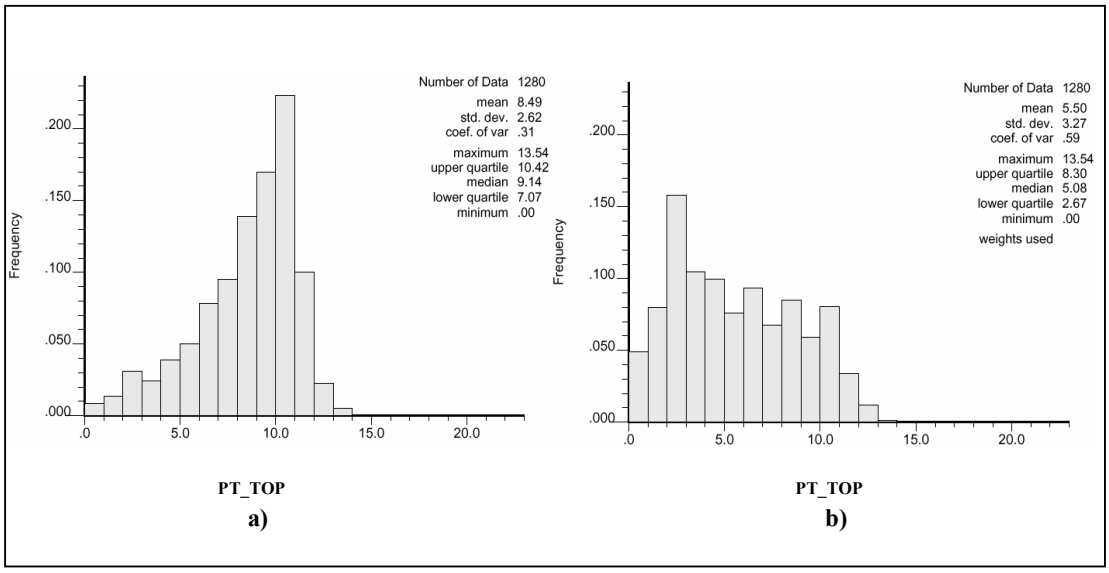


Figura 26. a) Histograma dos dados originais para os pontos do contato (PT_TOP) da superfície capeamento-minério, b) histograma dos dados desagrupados para os pontos do contato (PT_TOP) da superfície capeamento-minério.

Verifica-se aqui que o processo de desagrupamento acarretou em alterações na média dos pontos PT_TOP das amostras, apresentando para os dados agrupados uma média mais alta do que a média dos dados desagrupados, 8,49 metros e 5,50 metros, respectivamente.

Ao se analisar o mapa de localização dos furos de sonda no depósito (Figura 23), percebe-se que existe uma grande concentração de amostras em três regiões do platô (amostras de canaletas), configurando assim um agrupamento amostral considerável aos dados.

Pelos resultados apresentados se verifica a importância da realização do desagrupamento das amostras a fim de se obter uma idéia mais realista da média das mesmas ao longo da área de estudo. Nos passos seguintes, serão considerados como referência os valores obtidos dos dados desagrupados.

O uso de amostras agrupadas pode incorrer numa grande distorção em relação aos valores reais da população. Neste caso em particular, o desagrupamento das amostras é uma etapa imprescindível para que elas reflitam o mesmo comportamento estatístico da população.

4.9 Transformação gaussiana

O modelo de superfície será gerado mediante o uso de simulação seqüencial gaussiana. Uma maneira de tratar a função de probabilidade cumulativa condicional local como sendo multigaussiana é assumindo a distribuição normal dos dados. Entretanto, existe a inconveniência de que os dados devem se apresentar sob uma distribuição normal e o fato é que raramente os dados reais apresentam tal comportamento.

Dessa forma, é necessário recorrer à transformação dos dados originais para o espaço normal, (Goovaerts, 1997). O processo de normalização é realizado considerando os pesos de desagrupamento para o caso em que os dados estejam agrupados.

No caso de distribuições gaussianas, a distribuição condicional de freqüência acumulada local é estimada por meio de krigagem simples (KS), a qual define a média e a variância da distribuição.

Uma vez que existe uma distribuição condicional estimada por krigagem simples, pode-se retirar aleatoriamente um valor dessa distribuição e assim, gerar teores simulados para o bloco correspondente.

Uma da formas de se normalizar os dados (transformação gaussiana) é mediante a utilização de uma tabela de transformação, a qual permite uma correspondência ponto a ponto entre a distribuição dos dados da base original para a base normalizada com média centrada em zero e variância igual a um.

Após o processo de geração do modelo simulado, a mesma tabela é usada para fazer a transformação dos dados para base original. A Figura 27 mostra o processo de transformação dos dados para a base normalizada, através do uso de uma tabela de transformação:

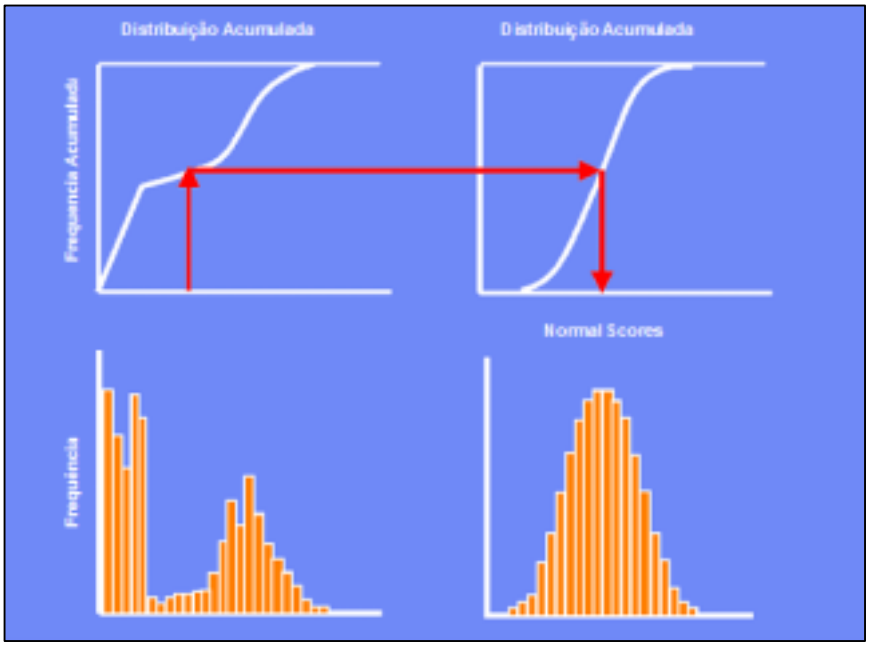


Figura 27. Transformação gaussiana através da correspondência ponto a ponto entre a distribuição original e a distribuição normalizada, modificado de Costa (2003).

A Figura 28 mostra a distribuição dos dados na base original e no espaço normalizado para os pontos de contato *PT_TOP*:

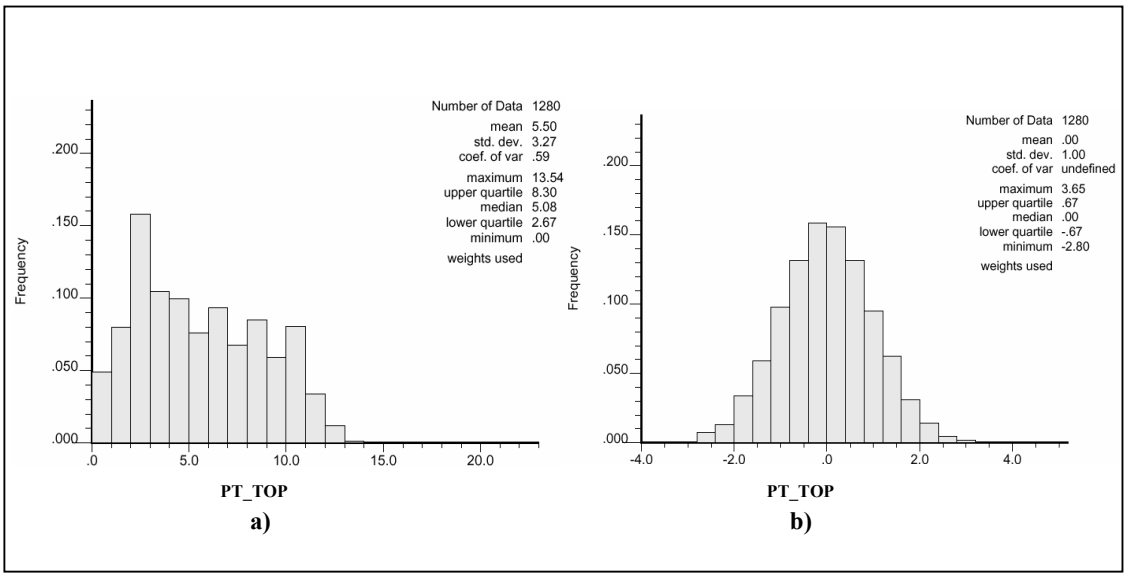


Figura 28. a) Histograma dos dados desagrupados para os pontos do contato PT_TOP, b) histograma dos dados normalizados para os pontos do contato PT_TOP.

Após a devida normalização dos dados, se segue a modelagem espacial do fenômeno.

4.10. Análise de continuidade espacial dos dados

Segundo Matheron (1963), a geoestatística compreende a aplicação do formalismo das funções aleatórias ao reconhecimento e à estimativa de fenômenos naturais. O conceito de variável regionalizada engloba simultaneamente uma componente aleatória e uma componente estruturada dos fenômenos medidos e georeferenciados. Diz-se que estes fenômenos são aleatórios porque não podem ser deterministicamente estimados em um dado local não amostrado, porém se estruturam de forma probabilística, seguindo determinadas leis de continuidade

espacial, aonde os valores amostrais não são independentes entre si e de sua localização geográfica, como na abordagem estatística básica.

Segundo Stangler (2001), a modelagem espacial constitui a inferência de seus parâmetros a partir dos dados disponíveis, fundamentalmente dos dois primeiros momentos, a média e a covariância. Para a apreciação de relações espaciais entre pontos afastados a dadas distâncias e direções, a continuidade espacial é quantificada através da variografia.

A ferramenta básica para modelagem espacial de fenômenos naturais é o variograma, o qual mede a variância espacial entre observações, dispostas a diferentes distâncias e direções definidas. Sendo assim, é possível estimar o variograma $2\gamma^*(h)$ dos dados disponíveis numa determinada direção, a partir da média aritmética (esperança matemática) das diferenças quadráticas entre dois valores experimentais separados a uma distância h, de acordo com a equação 4:

$$2\gamma^*(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \qquad (4)$$

Onde N(h) é o número de pares experimentais $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$ separados pelo vetor h.

Geralmente o estudo da continuidade espacial dos dados tem inicio com o cálculo de um variograma omnidirecional. Nele, todas as direções possíveis estão representadas em um único variograma.

Tal procedimento serve como ponto de partida para estabelecer alguns parâmetros que serão requeridos para cálculo dos variogramas experimentais direcionais.

Entretanto, o variograma omnidirecional não implica que a continuidade espacial dos dados seja a mesma em todas as direções; ele apenas indica uma estruturação espacial média apresentada pelos dados, uma vez que ele possui um número maior de pares de amostras que qualquer outro variograma direcional (Isaaks e Srivastava, 1989). A Figura 29 mostra o variograma omnidirecional para os pontos de contato PT_TOP:

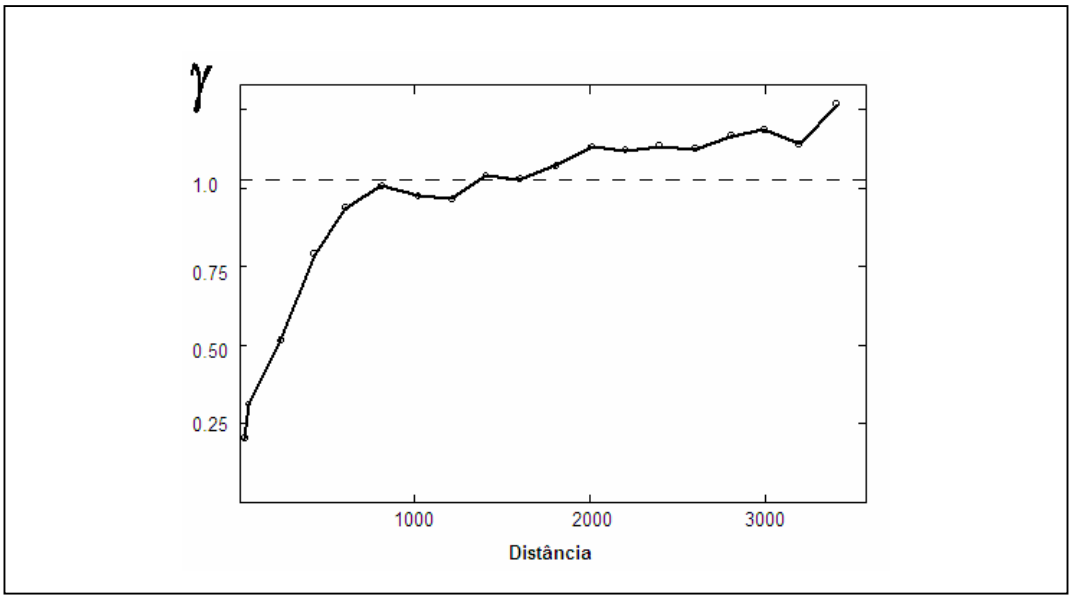


Figura 29. Variograma experimental omnidirecional dos pontos do contato PT_TOP.

A fim de se construir um modelo que capture as principais características espaciais do atributo em estudo, parte-se para a determinação dos variogramas direcionais. Segundo Gambin (2003), o processo de modelagem necessita de uma série de decisões do usuário, e estas devem ser confirmadas por dados experimentais e por informações auxiliares, permitindo desta forma medir o comportamento do fenômeno nas direções de maior e menor continuidade espacial.

De acordo com Isaaks & Srivastava (1989), uma maneira rápida de se obter informações sobre as possíveis direções de anisotropia de um fenômeno é através do uso de mapas de contornos variográficos dos dados.

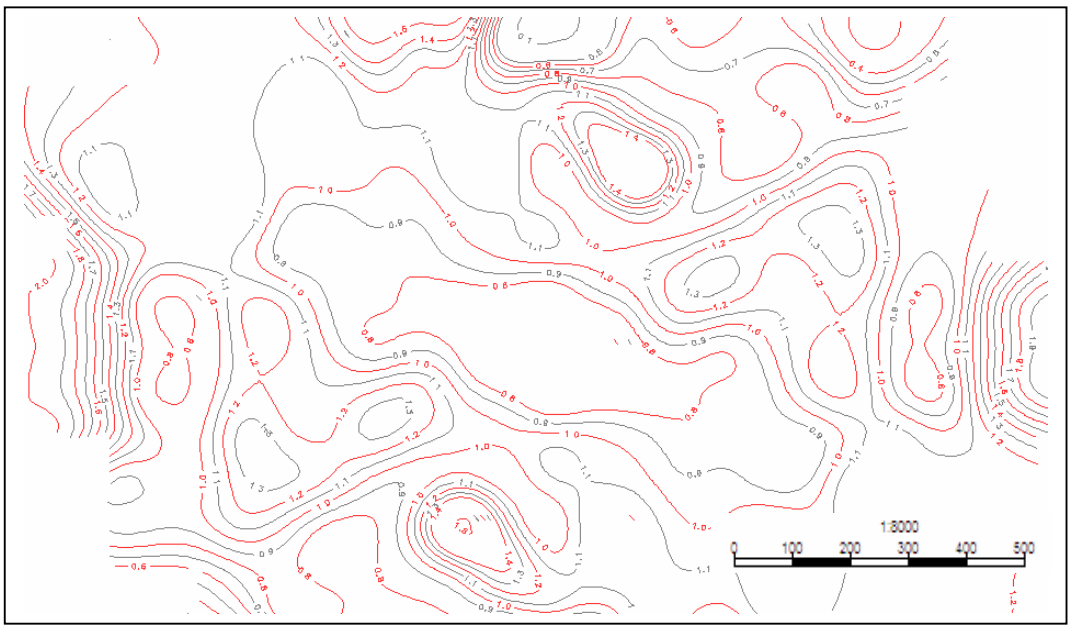


Figura 30. Mapa de contornos variográficos dos pontos PT_TOP.

A partir da construção de oito variogramas direcionais com espaçamento angular horizontal de 22,5^{o}, foi construído um diagrama em roseta com as distâncias obtidas em cada direção medida, obtendo desta forma uma medida da anisotropia geométrica para os pontos PT_TOP.

A Figura 31 mostra uma elipse com seus eixos maior e menor representando as direções de maior e menor continuidade do fenômeno, respectivamente 112,5^{o} e 22,5^{o}.

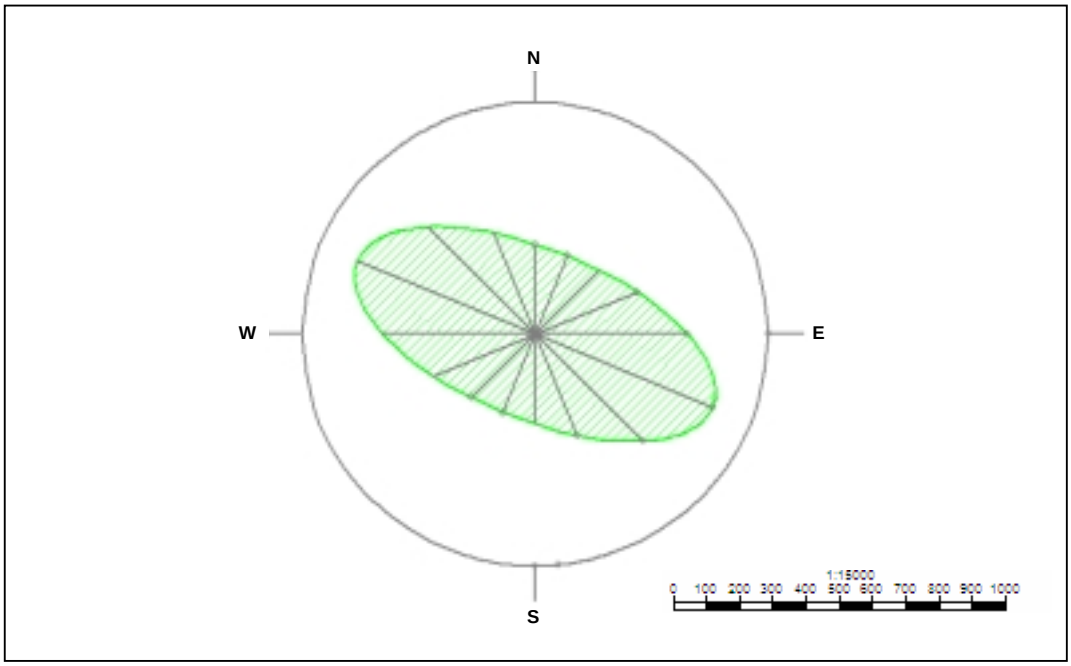


Figura 31. Anisotropia geométrica representada por uma elipse ajustada às oitos distâncias de correlação medidas nos variogramas direcionais para os pontos PT_TOP.

Existem diferentes modelos teóricos aos quais são ajustados os variogramas experimentais, sendo que tais modelos devem cumprir determinados requisitos para serem permissíveis (Goovaerts, 1997). Aqui será apresentado apenas o modelo de uso mais comum nas geociências e usado também neste trabalho, o modelo esférico.

O modelo esférico apresenta um crescimento rápido próximo da origem, onde tem um comportamento linear, como mostrado pelas equações (5) e (6):

$$\gamma(h) = C_0 + \left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right], \text{ para } h<a. \qquad (5)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C, \text{ para } h \geq a. \qquad (6)$$

A fim de tornar mais compreensível os modelos de continuidade espacial da variável modelada, é mostrada na equação (7) a notação abreviada da equação (5) e (6), sendo esta forma muito aplicada e recomendada para apresentações modelos de estruturas imbricadas:

$$\gamma(h) = C_0 + C * Sph\left(\frac{h}{a}\right) \qquad (7)$$

A equação (8) mostra o modelo de continuidade espacial através de sua notação abreviada ajustado para os dados normalizados dos pontos PT_TOP nas direções de maior e menor continuidade do fenômeno:

$$\gamma(h) = 0{,}10 + \left[0{,}23 * Sph\left(\frac{h(22{,}5^o)}{183{,}83}, \frac{h(112{,}5^o)}{101{,}39}\right) + 0{,}67 * Sph\left(\frac{h(22{,}5^o)}{769{,}57}, \frac{h(112{,}5^o)}{1228{,}14}\right)\right] \qquad (8)$$

A Figura 32 apresenta conjuntamente os variogramas direcionais ajustados para os dados normalizados nas direções de maior e menor continuidade espacial da variável PT_TOP.

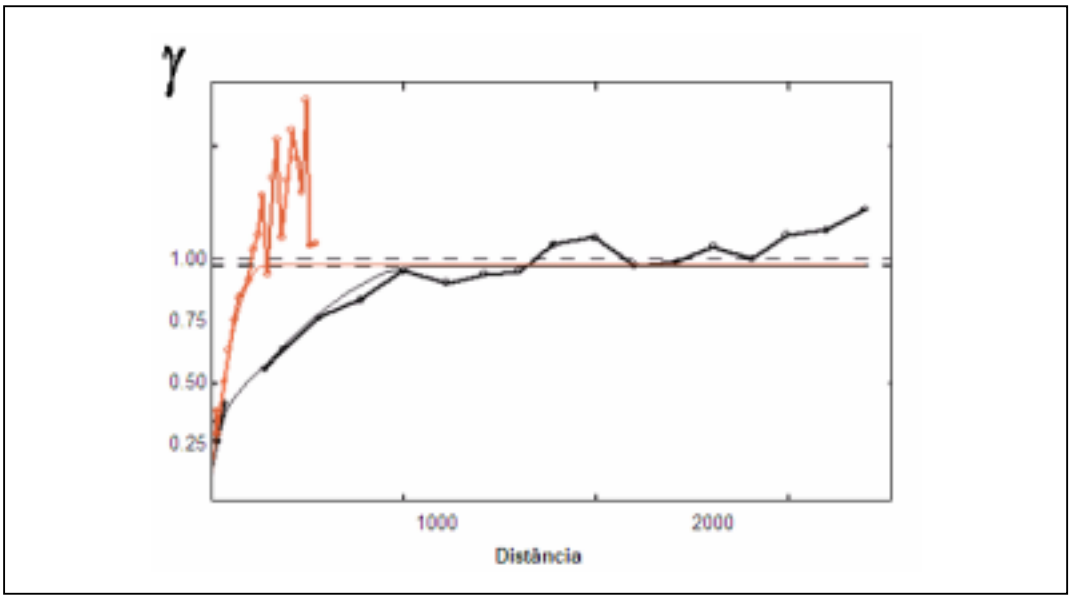


Figura 32. Modelo variográfico teórico ajustado para os dados normalizados PT_TOP nas direções de maior e menor continuidade espacial.

4.11. Validação cruzada

Segundo Costa (2003), a validação cruzada é a técnica que permite através da comparação entre valores reais e estimados das informações disponíveis a escolha da melhor alternativa entre diferentes procedimentos de estimativa, entre diferentes estratégias de busca ou entre diferentes modelos variográficos.

Com esta técnica as opções de estimativa são testadas nas localizações de amostras existentes. Um valor de uma amostra para uma dada localização é temporariamente descartado do banco de dados, sendo então estimado um valor para essa localização a partir das amostras remanescentes. Uma vez que a estimativa tenha sido obtida, podemos compará-la com o valor verdadeiro que havia sido inicialmente removido, e em seguida esse procedimento é repetido para todos os dados disponíveis.

Em cada localização onde uma estimativa foi realizada, temos um dado verdadeiro (v) e um dado estimado (v*). O erro (r) em cada localização é a diferença entre os valores estimados e verdadeiros:

$$r = v^* - v \qquad (9)$$

Se r é positivo, então nós temos uma super-estimativa dos valores verdadeiros; se r é negativo então nós temos uma sub-estimativa. Freqüentemente, esses erros são chamados de resíduos (r). A média da distribuição do erro é chamada de viés, e um objetivo razoável de qualquer método de estimativa é produzir estimativa não-tendenciosa, ou seja, com uma média da distribuição do erro próxima de zero.

Um gráfico dos valores verdadeiros contra os valores estimados fornece uma evidência adicional do nível de acerto atingido pelo método de estimativa. No caso de uma estimativa dita “perfeita”, os valores verdadeiros e os estimados estariam dispostos segundo uma reta de 45°. No entanto, na prática, sempre haverá algum nível de erro associado às estimativas, de maneira que os gráficos de valores verdadeiros contra os valores estimados aparecerão sempre como uma nuvem de pontos e não como uma reta.

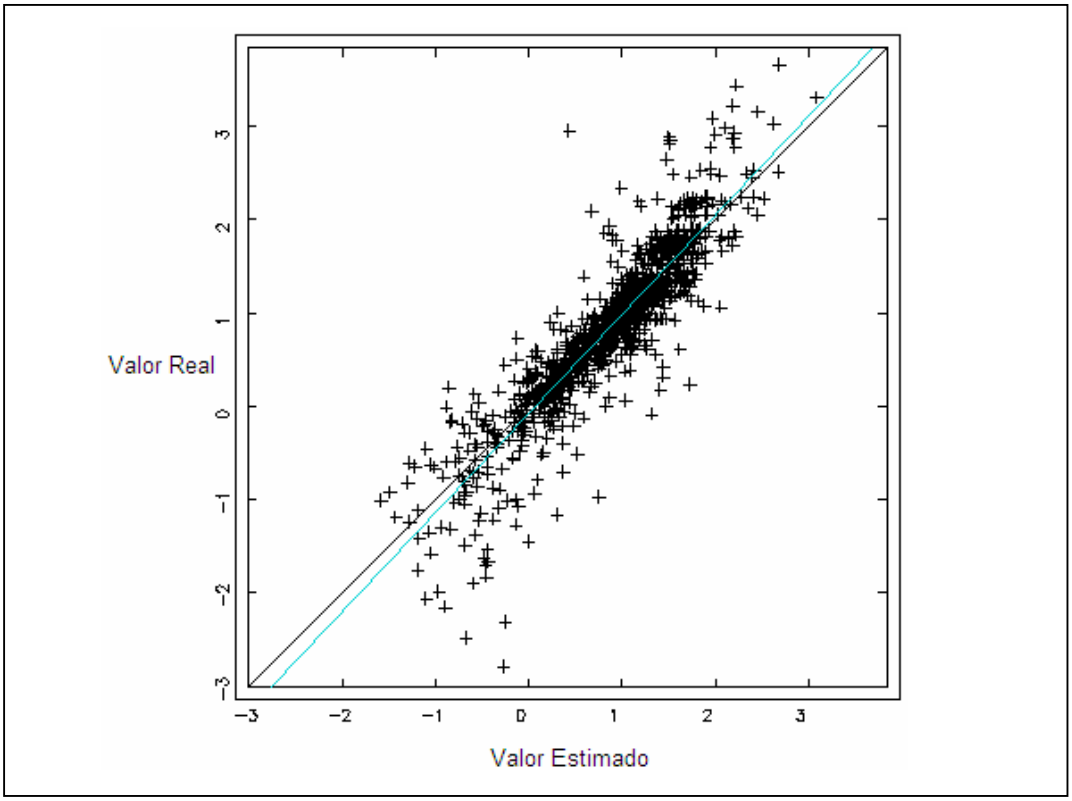


Figura 33. Gráfico dos valores reais contra os valores estimados dos pontos do contato normalizado PT_TOP.

Dessa forma, o espalhamento da nuvem de pontos ao redor da reta ideal também pode nos fornecer um indicativo do nível de acerto da estimativa. O coeficiente de correlação, por exemplo, é um bom índice para sumarizar quão boa foi a estimativa. De modo que quanto mais perto os pontos dispostos no gráfico estiverem da reta de

45º, melhor será a estimativa. No caso de uma estimativa ideal, o coeficiente de correlação seria igual a 1.0.

A equação 10 representa a equação de regressão dos dados estimados e é mostrada juntamente com o coeficiente de correlação (Equação 11):

$$v = -0{,}0703 + \left(1{,}0593 * v^{*}\right) \qquad (10)$$

Coeficiente de Correlação = 0,897 (11)

4.12. Verificação de multinormalidade dos dados

A simples normalização dos dados originais não garante que o modelo da função aleatória FR seja multinormal, mas apenas que sua distribuição univariada esteja no espaço normal.

Apesar da necessidade de se testar a normalidade da distribuição nos níveis bi-variados, tri-variados, até n-variados, só é possível a verificação até o nível bi-variado. Segundo Deutsch & Journel (1998) existem diferentes maneiras de testar a binormalidade dos dados, sendo que quando a binormalidade for verificada, a multinormalidade da distribuição poderá ser assumida.

Para testar a binormalidade dos dados foi utilizado um teste de binormalidade que considera a relação madograma/variograma. Nesta relação, o valor resultante deve se aproximar a constante 0,564 quando verificada para distintas distâncias de h, de acordo com a equação 12:

$$\frac{\gamma_1(h)}{\sqrt{\gamma_2(h)}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} = 0{,}564 \qquad (12)$$

Onde se tem que:

$$2\gamma_1(h) = E[|Y(x+h) - Y(x)|] \qquad (13)$$

$$2\gamma_2(h) = E\{[|Y(x+h) - Y(x)|]\}^2 \qquad (14)$$

Teste de binormalidade baseado na relação madograma/variograma.

Número de Pares	Madograma Experimental	Variograma Experimental	Razão Madograma/Variograma
3191	0,564	0,971	0,580
2691	0,586	1,045	0,560
2455	0,601	1,077	0,558
2518	0,611	1,077	0,567
1826	0,613	1,079	0,568
1759	0,594	1,031	0,576
1754	0,573	0,985	0,581
1455	0,553	0,973	0,568
1442	0,542	0,972	0,557
1629	0,525	0,902	0,581
1734	0,533	0,932	0,572
2120	0,529	0,892	0,593

4.13. Geração dos Modelos Simulados

Segundo Gambin (2003), a geração dos modelos simulados tem início com a definição de um caminho aleatório através do qual cada nó da malha (*grid*) ou bloco seja visitado e conseqüentemente simulado. Em resumo, existem N pontos a serem simulados e M dados originais, sendo {[z(u_a), a=1,... M<N]}. Para cada nó ou bloco visitado é realizada a estimativa da distribuição condicional local de probabilidade (dclp) através dos M dados originais e da krigagem simples com média e variância representadas nas equações (15) e (16):

Média: $Z_{SK}^{*}(u_1) = E\{Z(u_x)/M + x\}$ (15)

Variância: $\sigma_{SK}^{2}(u_1) = Var\{Z(u_x)/M + x\}$ (16)

Na dclp estimada no ponto $u_{x,}$ é selecionado aleatoriamente um valor dessa distribuição; esse valor (x) será o dado simulado nessa localização, que será adicionado ao banco de dados original. Sendo assim, o novo banco de dados será {[z(u_a), a=1,... M+x]}. Todos os pontos da malha ou blocos são visitados até que todas as localizações possuam um valor simulado.

Para geração de outras realizações igualmente prováveis da variável de estudo um novo caminho aleatório é escolhido e as etapas para geração de valores simulados nas N localizações são repetidas (Dimitrakopoulos, 1998).

Stangler (2001) apresenta de forma mais detalhada uma seqüência adaptada de outros autores, Olea (1999) e Deutsch e Journel (1998), do procedimento básico para gerar cada uma das realizações globais de um atributo através de simulação seqüencial gaussiana:

(a) Determinação da função de distribuição cumulativa univariada dos dados originais, ou seja, o histograma;

(b) Transformação dos dados para obter escores normais (normalização);

(c) Testes de binormalidade para os dados normalizados;

(d) Modelagem variográfica dos dados normalizados;

(e) Criação de uma malha de alta resolução (1 metro x 1 metro), coincidindo os nós da malha regular original de amostragem com alguns nós da malha de simulação;

(f) Escolha aleatória da locação u_i do nó para a geração de um valor simulado;

(g) Krigagem simples para obter a estimativa $z^*(u_i)$ e a variância de krigagem $\sigma^2(u_i)$, condicionada a uma amostragem expandida que englobe os dados vizinhos amostrais, além dos dados já simulados;

(h) Definição de uma distribuição normal local com média $z^*(u_i)$ e variância $\sigma^2(u_i)$: $N[z^*(u_i), \sigma^2(u_i)]$, onde $\sigma^2(u_i)$ corresponde à variância de krigagem simples. O valor simulado $z_{sc}(u_a)$ é então gerado aleatoriamente (através do método de Monte Carlo) a partir desta distribuição normal local;

(i) Adição de $z_{sc}(u_a)$ para a amostragem expandida (dados originais + dados previamente simulados);

(j) Retomada dos passos anteriores, passo (f) em diante, até preencher todos os nós da malha com valores simulados;

(k) Retro-transformação dos valores simulados do espaço gaussiano para o espaço original.

Na simulação seqüencial gaussiana as simulações são geradas utilizando os dados normalizados, resultando assim em valores simulados no espaço normal. Desta forma a retro-transformação dos dados simulados no espaço normal para o espaço original é realizada utilizando o caminho inverso utilizado na normalização inicial.

As extrapolações das classes extremas e interpolações das classes intermediárias são usualmente utilizadas (Deutsch; Journel, 1998). No caso presente, truncou-se o intervalo de valores simulados de acordo com os extremos amostrais originais, não havendo assim extrapolações.

4.14. Suporte Amostral

Embora não faça parte da simulação em si, a mudança de suporte é um passo realmente necessário para a abordagem da variância no estudo de variabilidade em geral. Suporte amostral, no contexto geoestatístico, é o tamanho/volume físico de uma amostra ou bloco sobre o qual é definida a medida.

De forma mais específica, suporte amostral é o “volume n-dimensional no qual valores linearmente médios de uma variável regionalizada podem ser computados”, (Olea, 1991).

Segundo Stangler (2001), a especificação completa do volume de um dado suporte compreende seu tamanho, forma geométrica e orientação. Qualquer mudança em algum desses itens implica numa nova variável regionalizada. Desta forma, o suporte considerado pode corresponder desde um ponto até o depósito inteiro. Os conceitos de suporte e de efeito suporte são desta forma fundamentais no tratamento geoestatístico de qualquer variável regionalizada.

O tamanho dos blocos foi definido dentro de dimensões que sejam representativas às amostras originais quase-pontuais, permitindo assim que a redução de variância

de dispersão nesta aproximação seja ínfima. Isso garante que as simulações sejam geradas diretamente com o mesmo suporte amostral, prevenindo contra distorções decorrentes de alteração de variância e variogramas em função de correção de suporte.

Segundo Journel e Huijbregts (1978), uma das alternativas é a realização de mudança de suporte *a posteriori*. Para isso, foi gerada uma malha de fina resolução que cobre integralmente toda a área com blocos de 1 metro x 1 metro.

Como se optou pela mudança de suporte *a posteriori*, todo o processo de simulação e validação foi executado no mesmo suporte amostral e em seguida se procedeu com a mudança para o suporte de bloco.

O processo de mudança para o suporte de interesse (blocos de 7 metros x 7 metros), suas implicações e resultados decorrentes, serão abordados mais adiante.

4.15. Validação das Simulações

Antes de se prosseguir com o pós-processamento dos modelos e uso dos mesmos, para medir a incerteza associada à diluição e contaminação das superfícies de contato capeamento-minério, foi realizada a validação das simulações para verificar se são reproduzidas as características de primeira e segunda ordem dos dados condicionantes (histograma e variograma). Para tanto, a validação das simulações teve de ser verificada tanto no espaço normal como no espaço original.

A Figura 34 apresenta a reprodução das características de primeira ordem dos dados de entrada nos histogramas da variável PT_TOP de três realizações escolhidas aleatoriamente, que foram retro-transformadas para o espaço original dos dados.

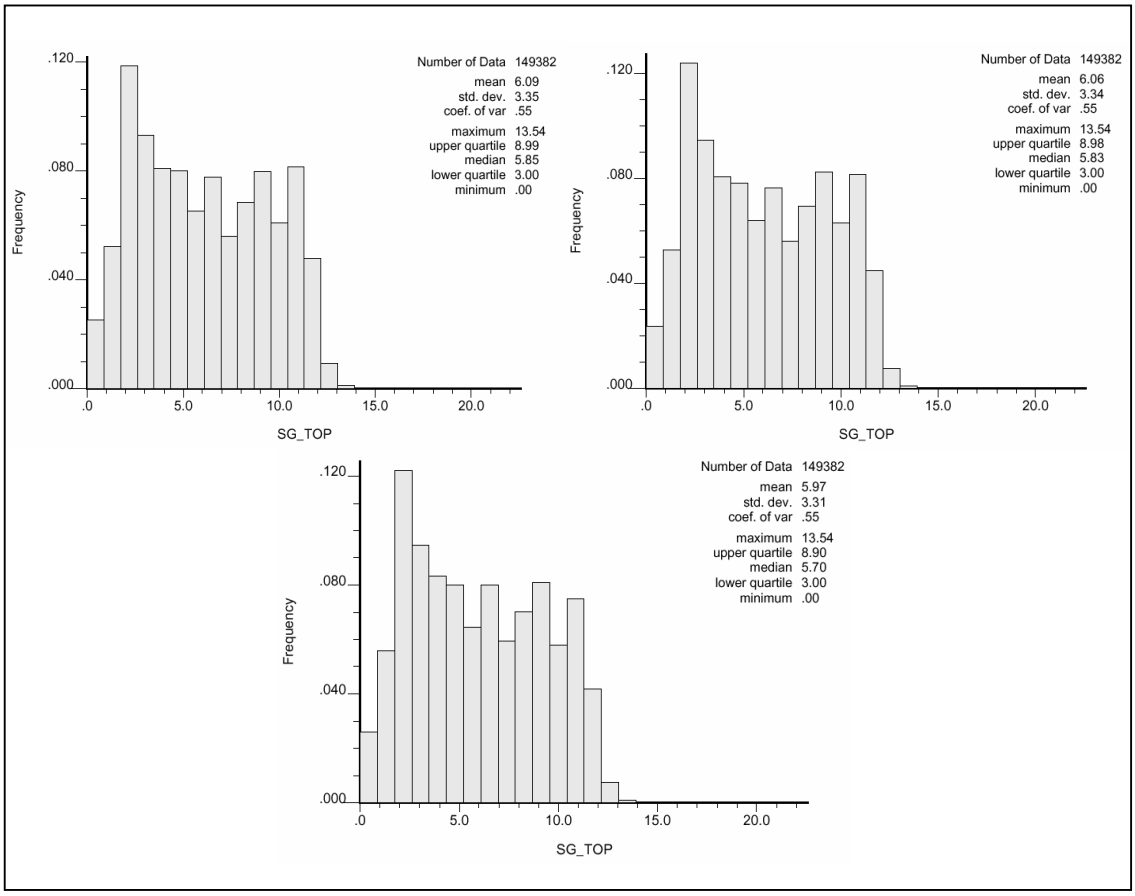


Figura 34. Histograma de três simulações escolhidas aleatoriamente dos pontos PT_TOP no espaço original dos dados.

A reprodução do momento de segunda ordem pode ser verificada na Figura 35, onde são apresentados os variogramas experimentais dos dados simulados de três realizações escolhidas aleatoriamente juntamente com o modelo dos dados originais no espaço normal, permitindo assim a comparação visual segundo a direção de maior continuidade espacial.

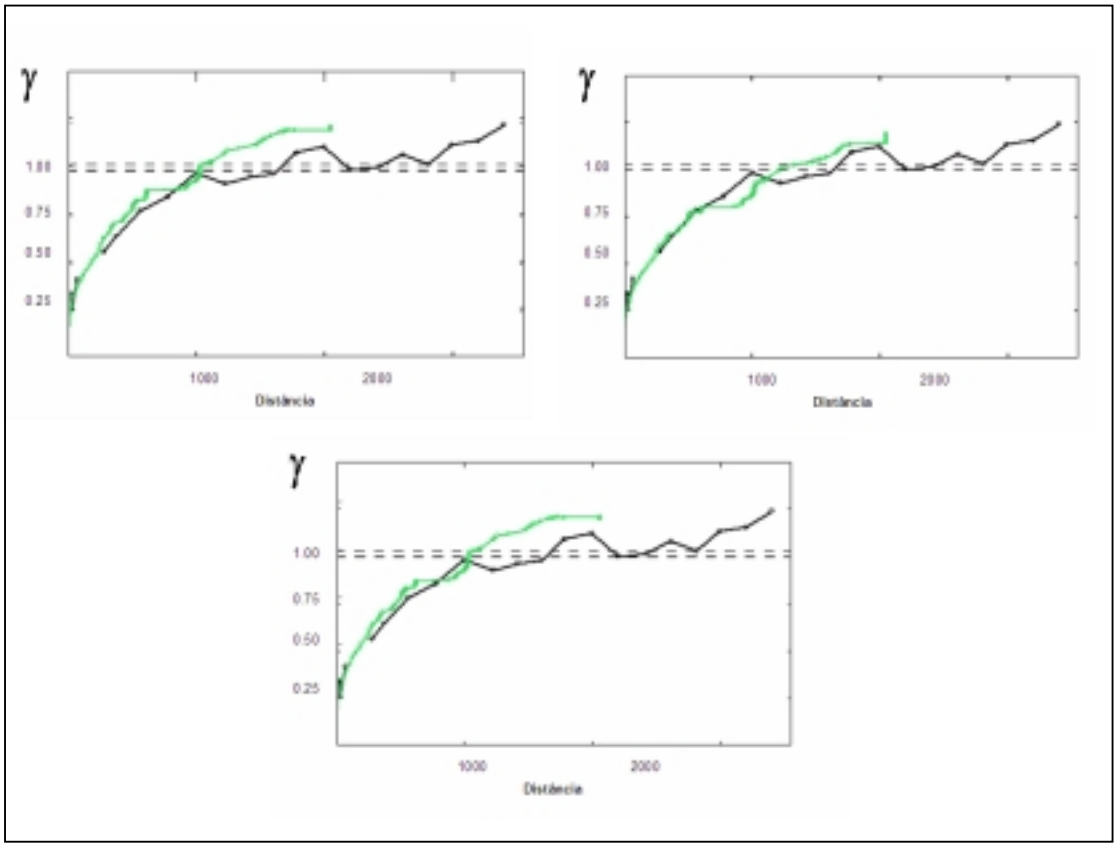


Figura 35. Modelos variográficos experimentais de três simulações escolhidas aleatoriamente dos pontos normalizados PT_TOP na direção de maior continuidade espacial.

A Figura 35 mostra que os variogramas experimentais de cada realização (linha verde) obedecem ao modelo de continuidade espacial das variáveis de trabalho, de forma que as curvas desses variogramas ficam em torno da curva do modelo original (linha preta).

Ao se analisar as realizações individuais para os pontos PT_TOP apresentadas nas Figuras 34 e 35 nota-se que as principais características mostradas pelos dados originais são reproduzidas. Entretanto, em linhas gerais, os modelos são diferentes entre si.

Com uma boa proximidade entre as feições de referência e as obtidas, todas as realizações podem ser aceitas e tomadas equiprobabilisticamente como possíveis cenários da população dos dados, em termos geoestatísticos.

Após essa etapa, seguiu-se com a mudança de suporte dos possíveis modelos simulados para blocos com dimensões de 7 metros x 7 metros, conforme mostrado a seguir.

4.16. Mudança de Suporte

Segundo Stangler (2001), todas as diferenças e implicações observadas entre o suporte de pontos e o suporte de blocos, no que tange à variância de dispersão podem ser estendidas para as simulações estocásticas.

Para verificar a variabilidade da superfície de contato capeamento-minério numa escala de blocos que permita uma associação direta com as unidades operacionais de lavra utilizadas na mina em estudo, ou seja, as dimensões mínimas de corte dos equipamentos utilizados na operação de decapeamento, é necessário um adequado processo de mudança de suporte, pois a informação amostral, conforme dito anteriormente é quase-pontual.

O processo indireto de simulação em blocos é apresentado de forma sumarizada a seguir (Journel; Huijbregts, 1978).

A alternativa aplicada para obter valores simulados de blocos consiste na simulação de valores quase-pontuais $z_{sc}(u_a)$ em uma malha muito densa (1 metro x 1 metro) e em seguida aplicar o método da média móvel de todos os pontos simulados que estejam incluídos em um bloco de 7 metros x 7 metros que corresponde aproximadamente à largura da lâmina do trator utilizado nas operações de decapeamento.

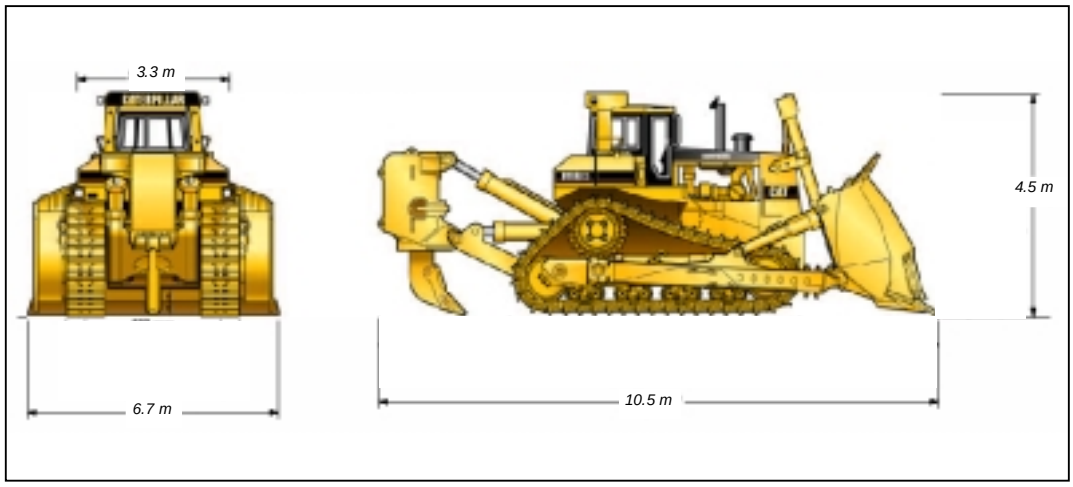


Figura 36. Mudança de suporte das simulações baseada nas dimensões mínimas de corte (aproximadamente 7,0m) do equipamento utilizado nas operações de decapeamento da mina do estudo de caso, modificado de Caterpillar (1999).

O método da média móvel resulta numa aproximação da simulação condicional direta de teores de blocos $z_{v,sc}(u_a)$. Como a simulação de pontos $z_{sc}(u_a)$ é condicional aos dados z_u, a simulação em blocos será por extensão condicionada aos mesmos dados.

O bloco é aproximado por *n* pontos interiores (x_i, i = 1 a n), e o verdadeiro valor do atributo de interesse do bloco v, obtido pela equação 17:

$$Z_v(x) = \frac{1}{v}\int_{(x)} Z(y)dy \qquad (17)$$

Este valor é aproximado pela média aritmética com os *n* valores dos pontos interiores de discretização do bloco, conforme a equação 18:

$$Z_v^*(x) = \frac{1}{v}\sum_{i=1}^{n} Z(x_i) \qquad (18)$$

Assume-se aqui que a densidade de discretização do bloco v, 49 blocos de 1 metro x 1 metro interiores em um bloco 7 metro x 7 metros, seja grande o suficiente para aceitar-se a aproximação da primeira pela segunda equação, considerando desta forma a função estrutural (covariância $C_v(h)$ ou variância $2\gamma_v(h)$) que caracteriza a variabilidade espacial do suporte v.

O método de simular blocos por janelas móveis de pontos (pequenos blocos) pré-simulados apresenta fortes vantagens: a) permite uma simulação simultânea de valores do atributo em blocos e em amostras interiores; b) não há nenhuma necessidade de assumir premissas sobre a variabilidade estrutural da distribuição univariada da FR regularizada $Z_v(x)$.

A simulação como um todo, e é baseada apenas na informação disponível obtida das amostras.

A partir da simulação no suporte quase-pontual, a geração de uma simulação para um novo tamanho de blocos, ou mesmo para blocos de dimensão variável, é obtida diretamente, (Chilès; Delfiner, 1999).

Stangler (2001) destaca que a desvantagem do método consiste no tempo computacional envolvido e o tamanho dos arquivos gerados. Entretanto tal fator

torna-se de importância secundária com o uso crescente de equipamentos mais poderosos em termos de desempenho computacional, incluindo a utilização de *Workstations*.

Segundo Costa (1997) a decisão de gerar 50 realizações para a variável de estudo foi baseada em um estudo que constatou que um número de 50 e 100 realizações é considerado suficiente para mapear a incerteza associada à estimativa do atributo geológico.

4.17. Modelo de superfícies simuladas

O modelo simulado no passo 4.16 foi utilizado para construção dos modelos digitais do terreno, neste caso em particular o modelo digital da superfície de contato capeamento-minério.

Segundo Schmitt e Bisquay (2001), na definição genérica, um modelo digital de terreno é um mapa que fornece a altitude em cada ponto, nos limites de uma determinada área de interesse. Numa perspectiva computacional, compreende imagens definidas a partir de uma malha regular.

A Figura 37 mostra o modelo de blocos do contato, gerado a partir das superfícies geológicas (contato capeamento-minério) simuladas condicionalmente. Em detalhe uma secção vertical do modelo de blocos do contato com diferentes níveis de incerteza associado ao modelo da superfície de contato:

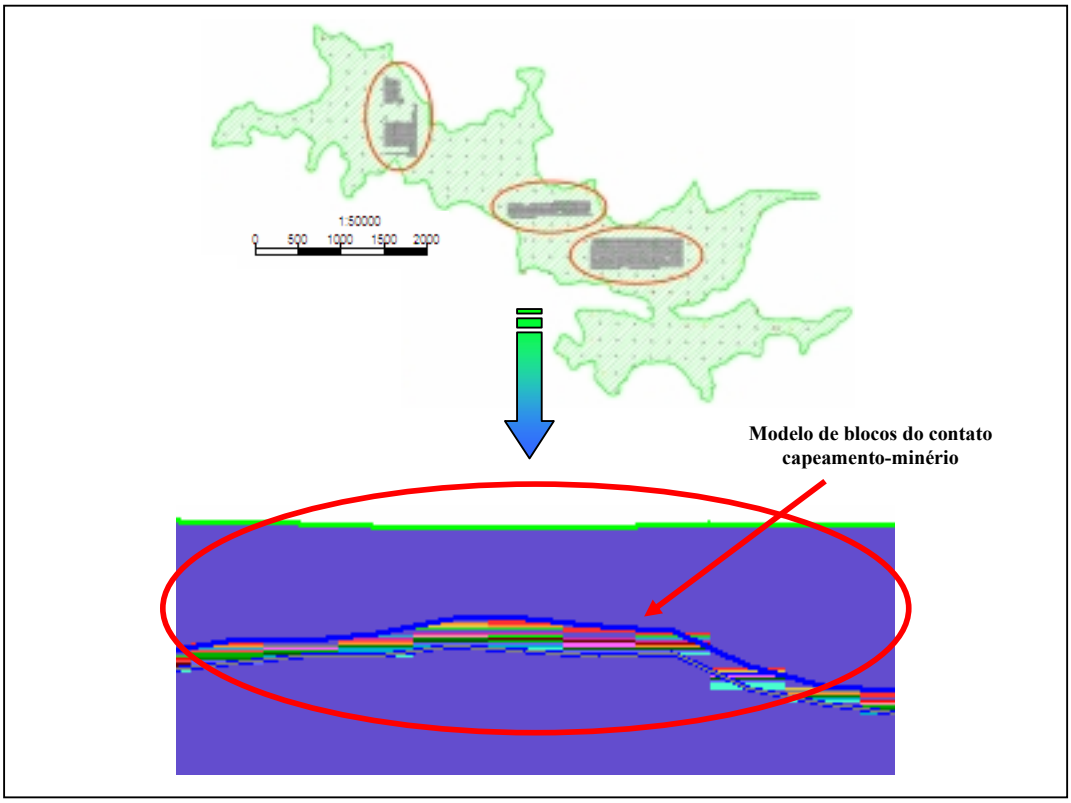


Figura 37. Modelo de blocos do contato capeamento-minério gerado a partir das superfícies simuladas condicionalmente.

As propriedades observadas no modelo de blocos simulado do contato capeamento-minério podem ser estendidas para as superfícies operacionais de corte, uma vez que estas últimas são simplificações de ordem operacional (geométrica) das flutuações observadas no contato geológico.

O modelo de blocos do contato capeamento-minério apresentado na Figura 37 foi utilizado para criação da superfície operacional de corte que por sua vez, está condicionada aos parâmetros operacionais das operações de decapeamento da mina.

A operação de decapeamento do material estéril com tratores é realizada mediante o controle dos seguintes parâmetros operacionais: a) inclinação de corte no minério, b)

distância de transporte e c) da inclinação da pilha de aterro da faixa anteriormente lavrada.

A Figura 38 apresenta os parâmetros ótimos operacionais para os tratores Caterpillar do tipo D11R (utilizado nas minas da MRN) que trabalham nas operações de decapeamento, os quais foram definidos pelo corpo técnico da mina em um trabalho anterior a esta pesquisa. Onde:

(a) Inclinação máxima de corte no minério: 35 % (19,3^{o});

(b) Inclinação máxima de aterro: 17 % (9,7^{o}) e

(c) Distância de transporte mínima: variável.

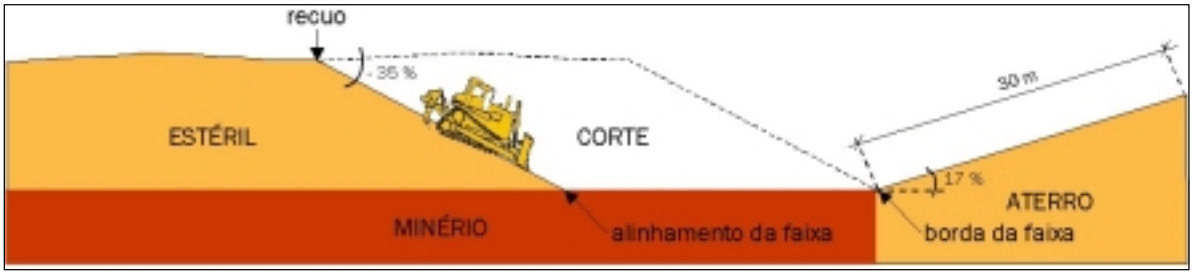


Figura 38. Operação típica de decapeamento de mina utilizando o método de lavra em tiras, modificado de Gatti e Barros (2003).

Em resumo a partir do modelo de probabilidade (modelo de blocos) do contato capeamento-minério apresentado na Figura 37, foi gerada uma superfície operacional de decapeamento em uma determinada área do platô, obedecendo: a) a orientação de lavra pré-existente; b) os parâmetros operacionais de lavra e c) o nível de incerteza associado ao corte do terreno.

A Figura 39 mostra uma superfície de decapeamento de uma tira de lavra em uma determinada área da mina em um corte que apresenta 10% de diluição máxima no contato capeamento-minério:

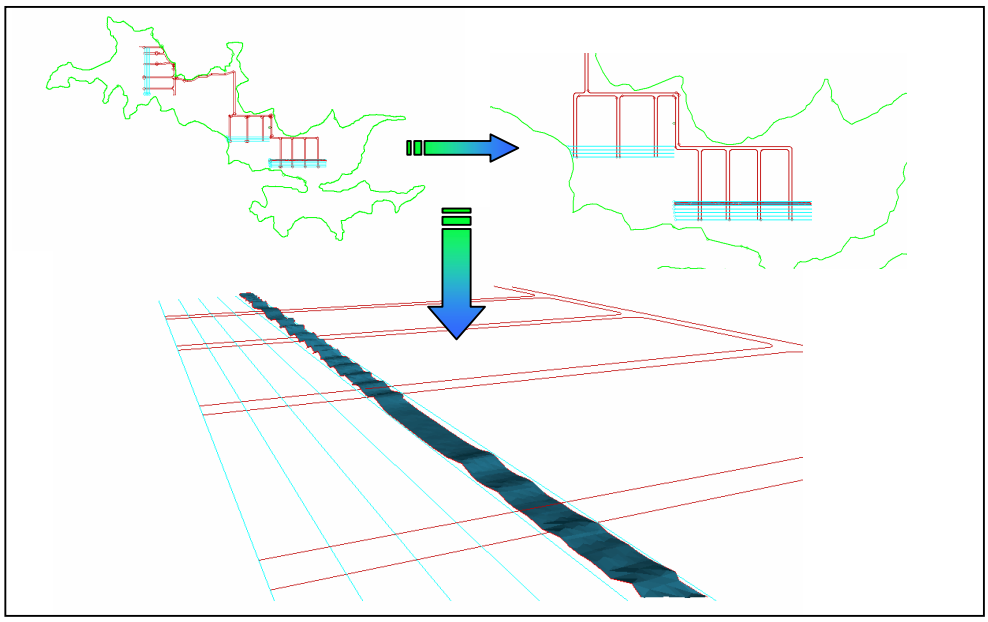


Figura 39. Detalhe da superfície operacional de corte a um nível de 10% de diluição máxima no contato capeamento-minério em uma determinada área do platô.

A Figura 40 apresenta o modelo de blocos que representa os possíveis pontos do contato capeamento-minério e a superfície operacional de corte a um nível de 10% de diluição máxima.

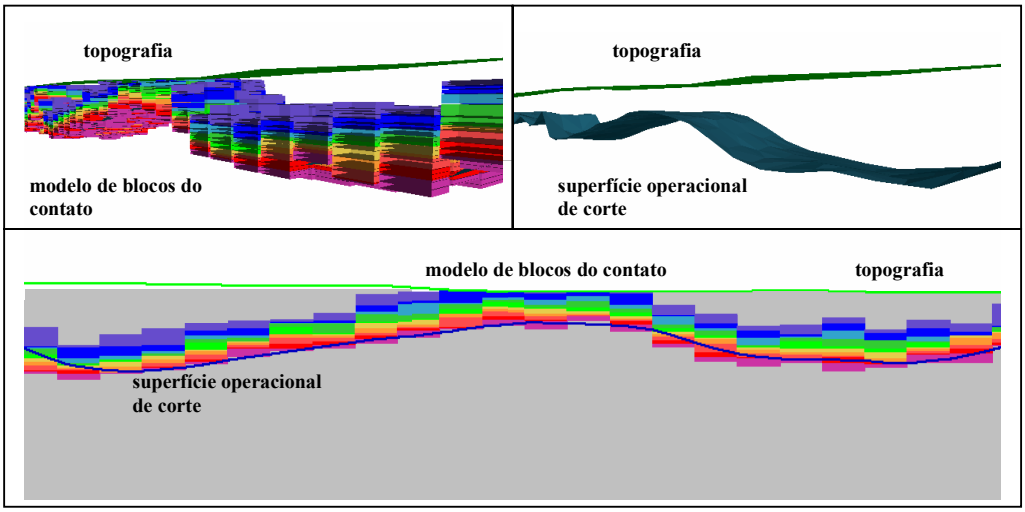


Figura 40. Modelo de superfícies simuladas e superfície operacional de corte no contato capeamento minério.

4.18. Análise de resultados

Os passos apresentados na Figura 41 ilustram os procedimentos seguidos para geração e entrega do plano operacional de lavra elaborado a partir da superfície de contato simulada:

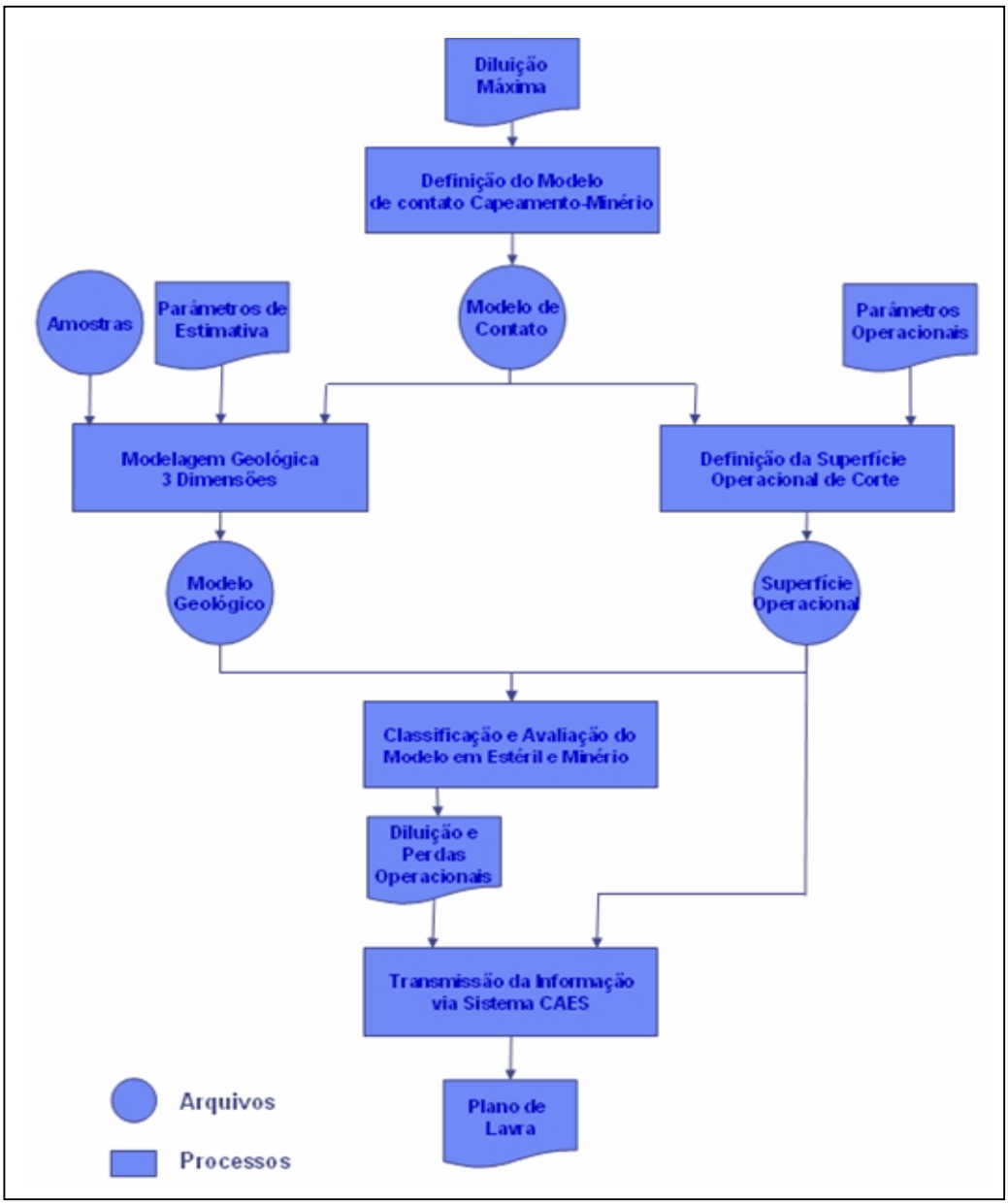


Figura 41. Procedimentos para geração do plano operacional de lavra.

De forma resumida os procedimentos para geração do plano operacional de lavra consistem em: a) definição da diluição máxima aceitável para um corte em determinada área; b) criação da superfície operacional de corte a partir do modelo de contato; d) geração de um modelo geológico em 3 dimensões e e) medição da diluição e perdas de minério associadas à superfície de corte.

Sendo assim, é possível transmitir a informação do nível de incerteza do contato capeamento-minério contido no modelo de probabilidades para a superfície operacional de lavra, permitindo a associação direta do nível de incerteza ao próprio corte no terreno.

As perdas associadas a este corte, ou qualquer outro corte no terreno, foram obtidas através da medição do material classificado como minério que está localizado acima da superfície operacional de decapeamento.

Sendo assim, mediante a utilização de um modelo tipológico simulado e de uma superfície operacional de corte, o pessoal do planejamento de lavra pode buscar um equilíbrio aceitável entre diluição e perdas para cada corte em diferentes de intervalos de confiança.

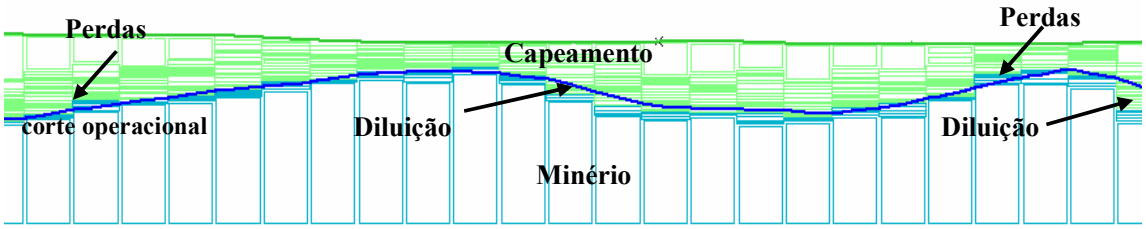


Figura 42. Superfície operacional planejada de corte, com indicação das áreas de diluição e perdas de minério, medidos a partir de um modelo de blocos em 3 dimensões.

Na impossibilidade de realizar testes com toda a metodologia proposta neste trabalho, foram realizados testes parciais através de um sistema semi-integrado (*software* de planejamento + tecnologia *wireless*) que tiveram como objetivo apenas a medição volumétrica da diluição e das perdas de minério na operação de decapeamento sem o uso de um modelo de blocos em 3 dimensões.

Além disso, não foi possível o uso de superfícies simuladas condicionalmente e transmissão de dados via satélite em tempo real, dessa forma a transmissão das superfícies operacionais entre planejamento e operação se deu através do uso de cartões de memória.

O cartão de memória é uma boa alternativa para transmissão de dados entre os equipamentos e o escritório para casos aonde ainda não exista o uso de uma conexão *wireless* (Figura 43). Desta forma o plano de lavra pode ser normalmente elaborado nos computadores dos escritórios e carregado nos computadores de bordo embarcado nas maquinas através do manuseio destes cartões.

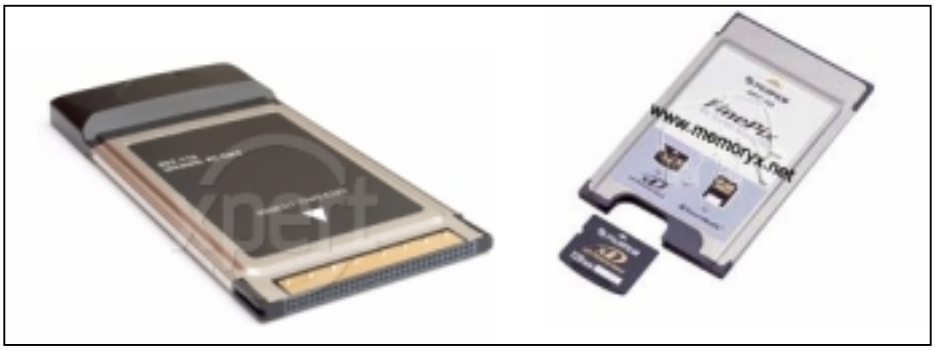


Figura 43. Cartões de memória usados para transmissão de dados entre escritório e equipamentos.

De mesma forma, uma vez que o plano de lavra seja executado pelo equipamento, o cartão de memória grava automaticamente a superfície final do corte realizado,

podendo esta carregada diretamente nos computadores do escritório. Com este procedimento pode-se dar prosseguimento às tarefas de medição e análise do plano de lavra elaborado versus o plano executado.

A seguir são mostrados os resultados que indicam benefícios que uma abordagem como esta pode trazer, mesmo que ela tenha sido aplicada de forma parcial (Sousa; De Tomi, 2005):

(a) 64% de redução média em perda de minério;
(b) 72% de redução média na diluição quando comparado com a metodologia tradicional;
(c) 0,19 metros contra 0,55 metros de erro médio contra a metodologia tradicional, com 0,27 metros e 0,68 metros de desvio padrão, respectivamente.

A simulação do acompanhamento e controle das atividades de decapeamento neste trabalho foi feita mediante o uso de um modelo virtual do processo. Neste modelo virtual cada objeto inserido pode ser conectado a programas, documentos, planilhas, etc, vinculados a um banco de dados acessíveis em uma rede local, *intranet* ou *internet*, apresentados em um ambiente de imersão virtual.

Embora a maioria dos *software* de modelagem geológica e planejamento de lavra permitam a visualização de um modelo ou frente de lavra em 3 dimensões por diferentes direções e ângulos, eles não podem ser considerados *software* de realidade virtual, pois não permitem a imersão do usuário ao ambiente.

Para isso seria necessário haver uma visualização estereográfica desses modelos ou frentes com a utilização de imagens duplicadas ou uso de óculos em 3D, Azevedo (2002). A Figura 44 apresenta um modelo virtual das operações de decapeamento descrita neste trabalho:

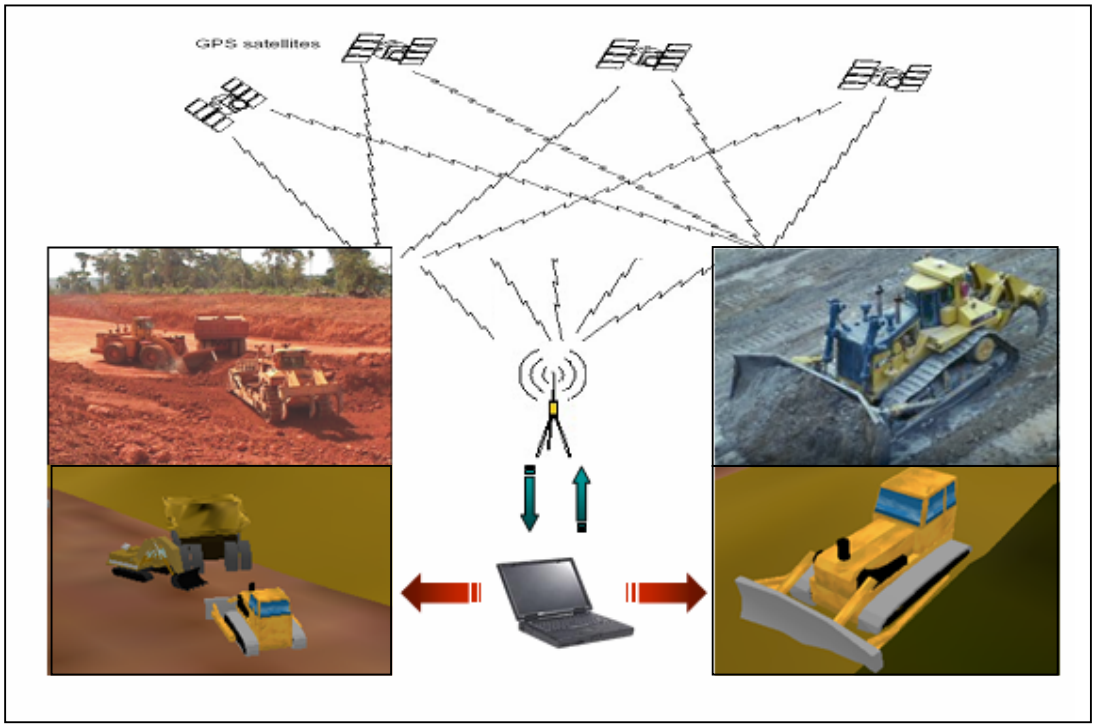


Figura 44. Modelo virtual das operações de decapeamento de mina integradas em tempo real.

Com utilização de um modelo virtual das operações de lavra como apresentado na Figura 44, é possível visualizar as informações integradas ao processo em tempo real, não somente acompanhando a produção e desempenho de equipamentos, como também realizando simulações de diferentes cenários.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para aprimoramento do controle de qualidade na atividade de decapeamento de mina (liberação de minério) no planejamento de lavra de curto prazo, assim como os resultados alcançados na aplicabilidade da mesma a um estudo de caso.

Para desenvolvimento desta metodologia foram utilizadas técnicas de simulação condicional em conjunto com outras ferramentas especializadas, tais como tecnologia *wireless* e *software* de realidade virtual, visando melhorias nas atividades de planejamento de lavra e operação de mina.

Ao se incorporar a incerteza que está associada à superfície de contato capeamento-minério ao plano de lavra, foi possível determinar a diluição máxima e as respectivas perdas contidas em um determinado corte operacional.

Para geração do modelo de variabilidade do contato tipológico foram apresentados os princípios de simulação seqüencial gaussiana, os quais serviram de base para geração do modelo de probabilidade para o contato capeamento-minério. Uma vez gerado este modelo, o mesmo foi validado e em seguida utilizado para geração da superfície de corte para liberação de minério baseado nos parâmetros operacionais de lavra. Os cortes operacionais foram gerados em porções individualizadas da mina, seguindo a orientação de lavra pré-existente.

Mesmo não sendo possível a total verificação da aderência dos resultados devido à impossibilidade de se testar toda metodologia proposta na mina estudo de caso, os resultados apresentados indicaram um ganho significativo nas operações de decapeamento.

A tecnologia *wireless* quando usada em conjunto com *software* de planejamento de lavra pôde diminuir erros comuns em métodos tradicionais que utilizam marcações e controles através de procedimentos manuais. A integração de diferentes tecnologias ao processo, tais como *software* de realidade virtual, permite que a tomada de decisão seja feita baseada em modelos mais precisos e realísticos, verificando e controlando em tempo real as operações de lavra.

Assim sendo, acredita-se que uma solução completa e integrada para atividades planejamento de lavra e operação de mina pode atender a uma boa parte dos requerimentos exigidos pelo processo, permitindo entre outras coisas, um melhor aproveitamento dos recursos geológicos.

5.1. Recomendações

Embora este trabalho tivesse o objetivo de testar toda a metodologia proposta em um estudo de caso, houve fatores externos que não permitiram aplicação de todos os testes previstos. O presente trabalho pode ser futuramente estendido para incorporar os demais testes faltantes.

Existe hoje na mineração um grande potencial para desenvolvimento de soluções integradas usando diferentes tipos de tecnologia. Estas soluções integradas têm foco na busca de melhorias no processo como um todo, viabilizando projetos, aumentando produtividade das atividades e reduzindo custos das operações de mina. A pesquisa pode ser estendida desde o estudo das atividades de lavra de minério através da modelagem da contaminação presente na superfície de corte minério-estéril de base, até a aplicação de outras técnicas de modelagem da incerteza do contato.

Do ponto de vista do prático, do dia-a-dia das operações de mina, é possível agregar as informações de variabilidade na qualidade do minério ao sistema de despacho da mina, integrando cada vez mais os sistemas existentes e maximizando o uso da tecnologia disponível.

Acredita-se que o uso completo de um sistema integrado como o proposto neste trabalho permitirá um aumento significativo na produtividade das operações devido a maior quantidade de informações fornecidas ao operador, aumentando a precisão das operações, eliminando o re-trabalho e garantindo maior segurança na execução das atividades de lavra, principalmente no caso de operações noturnas (Sousa; Pereira; De Tomi, 2004).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, JR; SILVA, S. **Introdução às redes wireless.** Rede Nacional de Pesquisa RNP e Rede Rio de Computadores, Rio de Janeiro. 2005

ARMSTRON, M. **Basic linear geostatistics.** Berlin: Springer, 1998, 153p.

AZEVEDO, R. **Aplicação de realidade virtual no planejamento de lavra.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CARLESS, J. World's largest copper producer Chile's Codelco uses Cisco wi-fi in mines. Disponível em: <http://www.wi-fitechnology.com/displayarticle1721.html>. Acesso em: 09 mar. 2006.

CATERPILLAR Inc. **CAES Overview – CAT© Computer aided earthmoving system.** Peoria: Caterpillar Inc. 1999.

CHILÈS, J.P.; DELFINER, P. **Geostatistics: modeling spatial uncertainty.** New York: Wiley-Intersciense Publication, Wiley Series in Probability and Statistics, 1999, 695 p.

CONOCIENDO la mina de Chuquicamata. Disponível em: <http://www.educarchile.cl/eduteca/todounmundo/02/chuqui/guia.htm>. Acesso em: 09 mar. 2006.

COSTA, J.F. **Notas de aula da disciplina de pós-graduação PMI 5019: Simulação condicional aplicada ao planejamento de lavra.** EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

COSTA, J.F. **Developments in recoverable reserves and ore body modeling.** PhD Thesis, WH Bryan Mining Geology Research Centre, University of Queensland, Queensland, 1997, 333p.

DATAMINE. **Datamine the mining software.** London: Reference Manual, 2004.

DE TOMI, G. **Relatório científico parcial do projeto gerenciamento integrado da cadeia de valor mineral (Projeto ERP-CVM-I) – FAPESP Nº. 02/13716-0.** São Paulo: EPUSP, 2004.

DE TOMI, G.; CEOTTO, H. V. **Pedido de auxílio à pesquisa – Projeto regular: G**erenciamento integrado da cadeia de valor mineral – Parte I (Projeto ERP-CVM-I). São Paulo: EPUSP, 2002.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A. G. **Geostatistical software library and user's guide**. New York: Oxford University Press, 1998, 369 p.

DIMITRAKOPOULOS, R. **Conditional simulation algorithms for modeling orebody uncertainty in open pit optimization.** International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 1998, Vol.12, p.173-179.

GAMBIN, F. **Aperfeiçoamento da estratégia de homogeneização de minério utilizando simulação geoestatística.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

GATTI FILHO, C.; BARROS, N. **CAES no decapeamento e liberação de minério na MRN.** In: 3ª Conferencia latino americana de usuários Datamine. 11º workshop Datamine do Brasil, 2003, Angra dos Reis. Anais 11º WORKSHOP DATAMINE DO BRASIL. São Paulo: Datamine Latin América.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation.** New York: Oxford University Press, 1997, 464p.

HABERKORN, E. **Teoria do ERP: Enterprise Resource Planning.** São Paulo: Makron Books, 1999.

HEATHER, B.; SOUSA, R.; LAPWORTH, A.; DE TOMI, G. **Management of iron ore quality through effective technology implementation using software systems designed from an IDEF0 analysis**. IRON ORE 2005. Fremantle, 2005.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics.** New York: Oxford University Press, 1989, 561 p.

JOURNEL, A. G. **Non-parametric estimation of spatial distributions – mathematical geology.** Volume 15, 1983 [S.l.:s.n.].

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978, 600p.

KBS Inc. **AIØ WIN Software – Function modeling and activity analysis**. Knowledge Based Systems, Inc. All Rights Reserved. Midwest City: KBS Inc. 2003.

MATHERON, G. **Principles of geostatistics.** Economic Geology, 1963 [S.l.:s.n.] p.1246-1266.

MUNICÍPIO de Oriximiná: Informações gerais. Disponível em: <http://www.governodopara.pa.gov.br/conhecaopara/oriximina1.asp.> Acesso em: 09 mar. 2006.

OLEA, R. A. **Geostatistics for engineers and earth scientists.** Kluwer Massachusetts: Academic Publishers, Norwell, 1999, 303p.

_____. **Geostatistical glossary and multilingual dictionary**. New York: Oxford University Press, 1991, 177p.

SCHMITT, M.; BISQUAY, H. **Structural description of digital elevation models**. South Africa: Geostats 2000, 6th International Geostatistical Congress, 2000. 9p.

SOUSA, R.; ARBIETO, C.C.; DE TOMI, G., **Execução de planos operacionais utilizando simulação condicional.** III Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e III Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea. Belo Horizonte, 2004.

SOUSA, R.; DE TOMI, G., **Wireless technology applied to mining planning.** 32nd International Symposium on Computer Applications in the Minerals Industry (APCOM). Tucson, 2005.

SOUSA, R.; DE TOMI, G., **Tecnologia wireless no planejamento de lavra de curto prazo.** Trabalho Completo Publicado em: Anais do 12º Workshop DATAMINE Brasil 2004. Salvador: DATAMINE Latin America, 2004.

SOUSA, R.; PEREIRA, S. L.; DE TOMI, G. **Aplicaciones de la tecnología wireless en planeamiento de minado.** MININ 2004, Santiago: Universidade de Chile, 2004.

STANGLER, F. **Abordagem probabilística na avaliação de depósitos de argila cerâmica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ZIMBACK, C. **Formação dos solos.** Grupo de estudos e pesquisas agrárias georreferenciadas – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.