

ARCIVALDO PEREIRA DA SILVA

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE CAVA FINAL
E SEQUENCIAMENTO DE LAVRA PARA A
MINA DE N5-SUL**

Monografia apresentada ao Programa
de MBA em Mineração – Programa de
Educação Continuada em Engenharia
USP e Companhia Vale do Rio Doce

SÃO PAULO

2003

ARCIVALDO PEREIRA DA SILVA

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE CAVA FINAL
E SEQUENCIAMENTO DE LAVRA PARA A
MINA DE N5-SUL**

Monografia apresentada ao Programa de
MBA em Mineração – Programa de
Educação Continuada em Engenharia USP
e Companhia Vale do Rio Doce

Área de concentração : Lavra de Mina
Orientador : Giorgio de Tomi

SÃO PAULO

2003

SUMÁRIO

1. Introdução	01
2. Objetivos	04
3. Revisão Bibliográfica	05
3.1. O Modelo Topográfico	06
3.2. O Modelo de Blocos	07
3.3. O Modelo Geotécnico	09
3.4. O Modelo do Projeto	10
3.5. O Modelo Econômico	12
3.6. Métodos de Determinação de Cava Final	14
3.6.1. Método dos Cones Flutuantes	14
3.6.2. Algoritmo de Lerchs-Grossmann	16
3.6.3. Parametrização Técnica de Reservas	17
3.7. Fluxo de caixa para um projeto de investimento.....	19
4. Metodologia	21
4.1. Teores de corte.....	23
4.2. Programa.....	25
4.3. Método Matemático de Geração da Cava.....	25
4.3.1. Função Econômica	25
4.3.2. Ângulos de Talude Geral	26
4.3.3. Características do Corpo de Minério	26
4.3.4. Custo de Relocação da Britagem.....	28
5. Discussão dos Resultados	30
6. Conclusões	43
7. Sugestões para Trabalhos Futuros	45
8. Referências Bibliográficas	46
9. Bibliografia	48
Anexos	49

LISTA DE FIGURAS

3.1. Seção representando o limite do modelo de blocos com a superfície topográfica	06
3.2. Vista em Perspectiva de superfície topográfica e sua orientação	07
3.3. Vista em Perspectiva de Modelo Geológico de Blocos	08
3.4. Exemplo de fluxo de um processo produtivo	11
3.5. Exemplo de Custos e Receitas dentro do processo produtivo	13
3.6. Fluxograma do Método dos Cones Flutuantes	15
3.7. Cavas Possíveis $f(Q, V, T)$	17
3.8. Cavas ótimas que maximizam Q e minimizam T e V	18
4.1. Vista Perspectiva do Modelo Topográfico – Topografia Original.....	21
4.2. Topografia Original com Restrições Geométrica da Cava de N5-Sul ..	24
4.3. Seção geológica horizontal - nível 520.....	27
4.4. Seção geológica vertical A – A'.....	28
5.1. Seleção de Cava Final - Evolução do NPV.....	33
5.2. Seleção de Cava Ótima - Evolução da REM, Estéril e Minério.....	34
5.3. Evolução do NPV nos pushbacks.....	36
5.4. Evolução Acumulada da REM, Estéril e Minério nos pushbacks.....	36
5.5. Pushback 1 - Topografia Original.....	37
5.6. Pushback 12 - Cava Final.....	37
5.7. Modelo de Blocos – Nível 520.....	38
5.8. Seção Vertical S-3100.....	39
5.9. Seção Vertical S-3200.....	39
5.10. Seção Vertical S-3400.....	39
5.11. Seção Vertical S-4800.....	40
5.12. Seção Vertical S-5750.....	40
5.13. Seção Vertical S-6300.....	40
5.13. Correlação NPV versus REM.....	41

10.1. Seção com blocos do modelo econômico.....	50
10.2. Lavra do bloco (1,4).....	50
10.3. Lavra do bloco (2,4).....	51
10.4. Lavra do bloco (3,4).....	52
10.5. Lavra do bloco (3,3).....	52
10.6. Configuração da cava final – Cones Flutuantes.....	53
10.7. Acumulação dos valores econômicos dos blocos.....	55
10.8. Análise dos blocos adjacentes.....	56
10.9. Análise final.....	56
10.10. Configuração da cava final – Lerchs-Grossmann.....	57
11.1a. Coluna Estratigráfica Informal da Província Mineral de Carajás (Hirata et al. 1982).....	59
11.1b. Mapa Geológico Parcial da Província Mineral de Carajás (modificado de DOCEGEO 1988).....	60
11.1c. Coluna Lito-Estratigráfica / Província Mineral de Carajás (Fonte: DOCEGEO 1988).....	61
11.1d. Mapa Lito-Estratigráfico e Estrutural Simplificado da Folha Carajás (modificado de Araújo et al. 1991).....	64
11.1e. Coluna Lito-Estratigráfica da Folha Serra dos Carajás (Araújo & Lima 1.91).....	66
12.1. Variograma da Al ₂ O ₃ – Ominidirecional.....	74
12.2. Variograma do Fe – Ominidirecional.....	74
12.3. Variograma do Mn – Ominidirecional.....	75
12.4. Variograma da P – Ominidirecional.....	75
12.5. Variograma da SiO ₂ – Ominidirecional.....	76
12.6. Variograma do PPC – Ominidirecional.....	76

LISTA DE TABELAS

4.1. Características do Modelo de Bloco.....	22
4.2. Teores Médios da variável Ferro nas faixas granulométricas.....	23
4.3. Fatores de Recuperação do Ferro.....	23
4.4. Teores de cortes aplicados ao corpo N5E.....	24
5.1. Avaliação e Resultados da Cava Ótima.....	30
5.2. Resultados das Fases (Cavas) na determinação da Cava Ótima.	31
5.3. Resultados Acumulados das Fases (Cavas) na determinação da Cava Ótima.....	32
5.4. Pushbacks - Dados incrementais.....	35
5.5. Pushbacks - Dados acumulados	35

DADOS BIOGRAFICOS DO AUTOR

Arcivaldo Pereira da Silva nasceu em 02 de setembro de 1966 em General Salgado - SP, filho de Idevaldo Pereira da Silva e Aparecida Giamatei da Silva. Casado com Silvane Ferreira e pai de quase dois filhos Victor e Carolina que nascerá em novembro próximo. Graduou-se em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Ouro Preto em julho de 1990 e especialista em Tecnologia Mineral pela Universidade Federal de Minas Gerais em 1993 e MBA em Gestão pelo IPG – Instituto de Pós Graduação de São Luis em 2000. Iniciou sua carreira na CVRD em 1994, como Engenheiro de Planejamento de Lavra trabalhando nas seguintes áreas: Geoestatística, Planejamento de lavra de Curto e Longo Prazo, Estudos e Projetos de Mineração das Minas de Ferro de Carajás e o Sistema de Despacho Eletrônico. Atualmente, trabalha na Gerência de Área de Automação Industrial do Sistema Norte, sendo responsável pelo Sistema PIMS e desenvolvimento de novos projetos de automação industrial na CVRD-DIFN.

**À minha esposa Silvane e aos
meus filhos, Victor e Carolina.**

AGRADECIMENTOS

À Companhia Vale do Rio Doce , nas pessoas de José Luis de Oliveira Martins por possibilitar a realização deste curso, acreditar no meu potencial, permitindo meu crescimento técnico e pessoal e Vânia Andrade pelo empenho na realização e concretização deste curso, aos dois meu sincero muito obrigado.

Ao Flavio Moreira Ferreira, pela orientação e dicas muito importantes que, sem elas, não seria possível escrever esta monografia.

Ao colega e orientador Giorgio di Tomi , pelo incentivo, participação e paciência mesmo durante meu sumiço no período em que realizamos este trabalho.

Aos colegas de trabalho que colaboraram das mais diversas formas, discutindo, ouvindo, criticando, ensinando e estimulando: geólogo Paulo Henrique Matias, aos engenheiros Evangelina Apparicio, Leonardo Apparicio e Sérgio dos Santos Pena .

RESUMO

A determinação da cava final é essencial para a avaliação econômica de um projeto de mineração. Adotando-se as restrições geométricas e os parâmetros econômicos pertinentes, a determinação desta cava é uma tarefa de aplicação de uma metodologia que maximize o seu valor econômico.

Os projetos de mineração são em geral, projetos que não apresentam o retorno do capital investido em um curto espaço de tempo. Às vezes, por questões técnicas e pressões econômicas estudam-se alternativas para que o capital investido tenha um retorno mais rápido, mesmo não tendo um aproveitamento total das reservas.

Esta monografia inicia-se com a definição do projeto de elaboração da cava final, suas fases, modelos necessários e métodos matemáticos para determinação da cava. Posse da cava ótima, determinar um sequenciamento da lavra tendo como diretriz uma REM (Relação estéril minério) extremamente baixa no início da mina e aumentando com o tempo.

A objetivo é verificar qual é limite da REM, onde o custo de lavra do estéril é maior que o custo de relocação da britagem semimóvel para uma outra mina ou outra posição dentro da mesma. Este estudo foi feito para a Mina de N5-Sul, na Serra de Carajás, pertencente à Companhia Vale do Rio Doce.

1. INTRODUÇÃO

A indústria mineral apresenta características singulares em relação a outros tipos de empreendimentos. Alto investimento inicial associado a elevados custos operacionais, mesmo associados à economia de escala que reduzem os custos de lavra, longo período de pré-produção e a exploração de recurso não renovável, distingue este tipo de indústria da grande maioria das outras. As variáveis de mercado, as restrições operacionais, geométricas e geotécnicas, a interação com o meio ambiente e, principalmente, a definição geométrica da geologia (modelagem geológica) são os principais tópicos que devem ser conhecidos em detalhe, de forma a permitir que os riscos do empreendimento estejam dentro dos limites aceitáveis pelo investidor. A definição destes limites dependerá de fatores como o tipo de minério, a disponibilidade de capital aliada ao custo financeiro do investimento, retorno desejado, dentre outros. Neste ambiente, novas tecnologias vêm sendo implementadas em todas as atividades de um projeto de mineração. Novas formas de beneficiamento de minério que maximizam a recuperação e a qualidade do produto, a atualização tecnológica dos equipamentos de mineração possibilitando o aumento da produtividade na lavra, a implementação de técnicas mais apuradas nas áreas de geologia e planejamento de lavra, novos procedimentos aplicados à estabilidade de taludes, dentre outros itens, aliados à maior profissionalização do setor, têm auxiliado na redução dos riscos financeiros do projeto.

A industria mineira está também buscando novos caminhos para otimizar e aumentar a produtividade dos equipamentos por ela utilizados, desta forma, muitos investimentos nas interfaces mina/usina estão sendo implementados, com o objetivos de baixar os custos operacionais de produção.

Com relação à geologia e ao planejamento de lavra, as principais inovações técnicas vieram associadas ao desenvolvimento da indústria da informática. Tais inovações viabilizam análises mais apuradas relativas a modelagem geológica, tanto na distribuição espacial quanto na sua caracterização física e química. Estas inovações permitem, também, melhores análises do sequenciamento da lavra ao longo da vida

da mina e da determinação da cava final. O planejamento das operações de lavra assume, portanto, uma importância significativa dentro de um empreendimento mineiro. Especificamente, a otimização da cava final pode determinar a viabilidade de um projeto de mineração.

A determinação da cava final ótima define a porção da reserva geológica que deverá ser lavrada, maximizando o seu valor econômico total, a partir de parâmetros técnicos e econômicos pré-estabelecidos. Assim, esta cava representa o máximo retorno financeiro, desde que a lavra seja realizada segundo as premissas utilizadas quando da sua geração.

Este estudo de determinação da cava final deverá ser realizado no início do projeto e sempre que ocorrerem alterações significativas em suas premissas, por exemplo, aumento do preço de venda do produto, redução dos custos de beneficiamento, reavaliação do modelo geológico e mudança de ângulo geral de talude.

Várias são as metodologias utilizadas neste processo de otimização, dentre as quais se destacam:

- a) Método dos Cones Flutuantes;
- b) Algoritmo de Lerchs-Grossmann;
- c) Parametrização Técnica de Reservas.

As opções de sequenciamento de lavra permitem aos engenheiros de minas estudarem qual é a melhor maneira de se lavrar o corpo mineralizado. Nem sempre a melhor maneira é a que agrada os investidores que querem um retorno do capital investido o mais rápido possível. A opção de se lavrar com uma relação estéril minério bem baixa no inicio das operações de uma mina pode inviabilizar a operação no final da vida desta. Em contrapartida, este investidor terá antecipado a recuperação do capital investido em um período menor que o tradicional da industria mineira, mas não significa que este lucro seja maior que o obtido com a lavra da cava ótima.

A jazida de N5-Sul é um prolongamento do corpo de N5E, que hoje se encontra em lavra pela Cia Vale do Rio Doce em Carajás. As informações utilizadas para a elaboração dos modelos geológico, de teores e topográfico, foram retiradas, em sua grande maioria, da campanha de sondagem que findou em 1972. Portanto, este é um modelo preliminar que dará suporte à equipe da Gerência de Área de Planejamento e Geologia, nas primeiras decisões sobre o direcionamento da lavra nas Minas de Ferro da CVRD em Carajás para os próximos 10 anos.

Para este estudo, não foi considerado um modelo geotécnico, o ângulo médio de talude considerado corresponde ao da máfica decomposta que é lavrado na Mina de N4E de 30 graus. O que, a princípio, demonstra que a cava poderá ser muito melhor caso a geologia seja validada na campanha de sondagem que está sendo realizada. Outra consideração muito importante em relação ao modelo, é que toda a canga de minério foi considerada estéril, elevando assim a relação estéril minério da cava final. Esta premissa foi utilizada porque a canga de minério apresenta teores de contaminantes, alumina e silica, mais altos que os da Hematita e sua participação no ROM é muito pequena, da ordem de 5%. Como a quantidade de canga de minério é muito grande, cerca de 300 Mt (milhões de toneladas) , significa que apenas parte deste total será considerado minério, desta forma optou-se por ter premissas conservadoras no desenvolvimento deste trabalho.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal desta monografia é realizar um estudo de limite da Relação Estéril Minério (REM) contra a relocação da britagem primária, em outras palavras, este estudo consiste em verificar qual é o limite da REM onde o custo de lavra do estéril é maior que o custo da relocação da britagem primária semimóvel.

Aliado a este objetivo, temos outros objetivos complementares relacionados ao objetivo principal, tais como: revisão das técnicas de obtenção de cava final, sequenciamento de lavra e sensibilidade do VPL em relação a REM.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A determinação da cava final é essencial para a avaliação econômica de um projeto de mineração. Adotando-se as restrições geométricas e os parâmetros econômicos pertinentes, a determinação desta cava é uma tarefa de aplicação de uma metodologia que maximize o seu valor econômico.

Podemos considerar a determinação de uma cava final como o resultado de uma seqüência de procedimentos que, em geral, independem da ferramenta computacional utilizada. Deverão ser criados diversos modelos que servirão de base para esta determinação, representando as informações e parâmetros do projeto. Os principais modelos são:

- a) Modelo topográfico;
- b) Modelo de blocos;
- c) Modelo geotécnico;
- d) Modelo do projeto;
- e) Modelo econômico;

Em geral, todos estes modelos serão refinados ao longo da execução do projeto. Com o desenvolvimento da lavra, ocorrerá um detalhamento maior da superfície topográfica, o nível de conhecimento geológico será ampliado pelo mapeamento e amostragem das frentes de lavra, ensaios geotécnicos mais representativos poderão ser desenvolvidos, além da possibilidade de uma melhor estimativa dos custos envolvidos.

A dinâmica do processo de determinação de cava final ocorrerá ao longo de toda a vida da mina, sendo crítico no momento em que a lavra se aproxima dos limites da cava e nos últimos anos de vida da mina (Kim, 1978). Caso não seja realizada uma nova avaliação, aproveitando-se das informações técnicas e econômicas mais apuradas, a realização da lavra na borda da cava poderá levar a uma expansão excessiva dos limites, bem como uma lavra aquém da necessária. No primeiro caso, a

perda econômica é caracterizada pela movimentação adicional de estéril realizada sem necessidade, e no segundo, pelo aumento do custo de lavra por questões operacionais.

As dificuldades de lavra nos últimos anos de vida da mina ocorrem, principalmente, nas questões operacionais. O espaço físico da cava é, geralmente, bastante restrito e qualquer alteração poderá gerar constrangimentos operacionais importantes, podendo inviabilizar o aprofundamento da cava, com perda no volume de minério, alterando o fluxo de caixa da empresa em curto prazo.

3.1. O MODELO TOPOGRÁFICO

A área do depósito mineral deverá estar detalhada em termos de suas coordenadas NS (Y) e EW (X) e altitude (Z), criando o mapa topográfico que servirá de base para a construção das seções geológicas verticais e horizontais. Estas informações determinarão o alcance máximo da cava final horizontalmente e irão distinguir, verticalmente, a superfície topográfica que pode ser considerada como a transição entre os blocos do modelo e os blocos de ar conforme Figura 3.1.

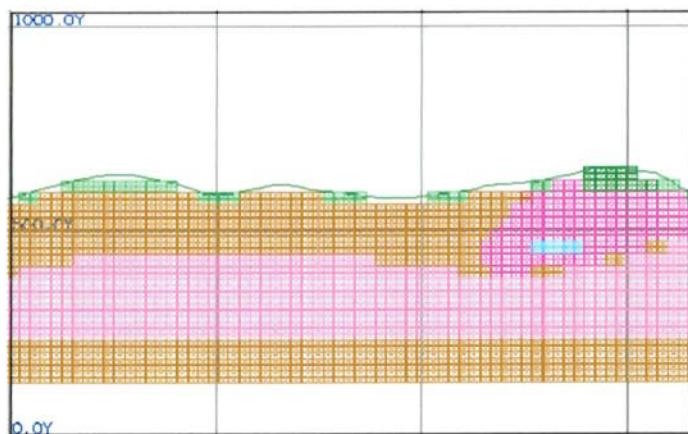


Figura 3.1 - Seção representando o limite do modelo de blocos com a superfície topográfica.

A elevação máxima da área determinará o máximo valor da coordenada Z do modelo de blocos. Em geral, os programas de determinação de cava final utilizam arquivos ASCII, formatados especificamente com as coordenadas X, Y e Z, ou criam a superfície topográfica a partir do modelo de blocos. Na Figura 3.2, é representada uma vista em perspectiva de uma superfície topográfica com a orientação dos eixos das coordenadas X, Y e Z.

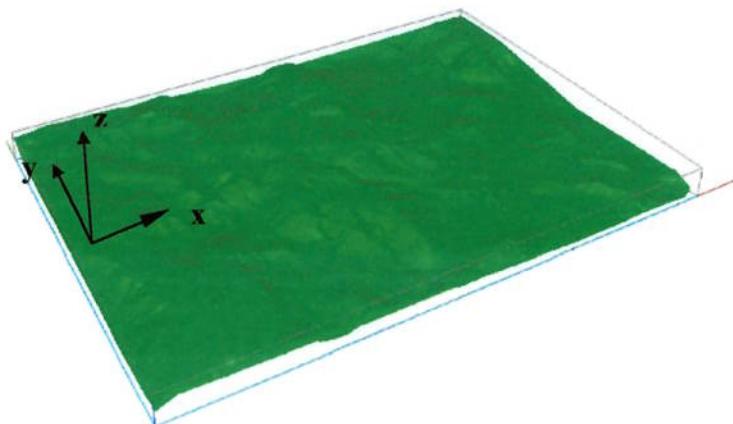


Figura 3.2 – Vista em perspectiva de superfície topográfica e sua orientação

3.2. O MODELO DE BLOCOS

Uma das técnicas para a determinação da cava final está centrada na discretização de um modelo real em um modelo tridimensional de blocos. Este modelo será criado a partir das seções geológicas verticais e horizontais ou wireframes sólidos do corpo mineral e das litologias adjacentes, interpretadas através das informações de superfície e sub superfície, por meio de mapeamento, sondagem, caneletas, dentre outros trabalhos. A Figura 3.3 apresenta uma vista em perspectiva de um modelo de blocos.

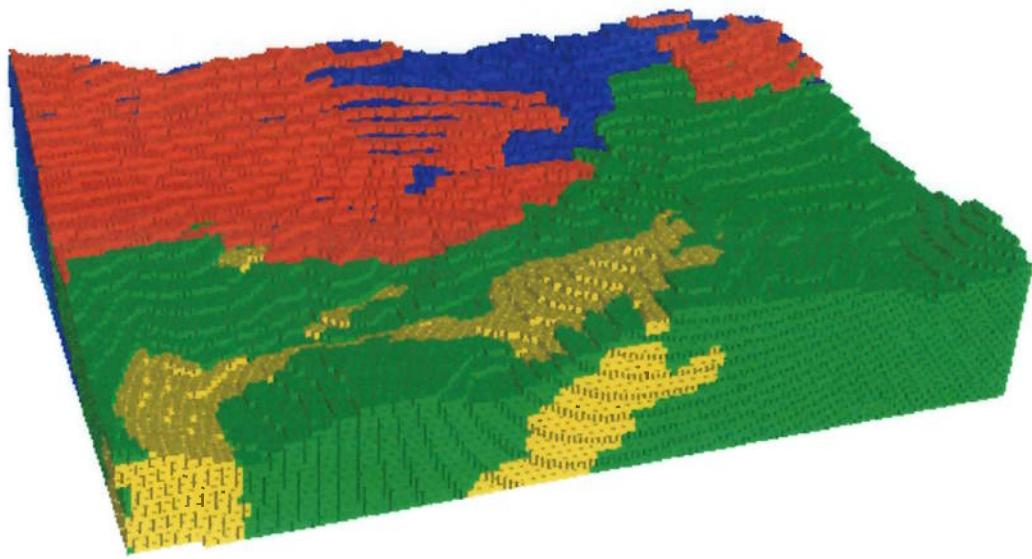


Figura 3.3 – Vista em Perspectiva de Modelo Geológico de Blocos

Todas as informações disponíveis e essenciais deverão estar contidas neste modelo. Os principais, e mais comuns, dados que deverão existir em cada bloco, enfocando jazidas de minério de ferro, são a litologia, características físicas (distribuição granulométrica) e químicas (teor das principais variáveis químicas por faixa granulométrica) do corpo de minério, densidade, tonelagem e posição do bloco no espaço através de suas coordenadas X, Y e Z. A inclusão de outras informações como umidade, características metalúrgicas, recuperação, diluição, dentre outras, poderão ser necessárias conforme as características específicas de cada projeto.

Salienta-se que o aumento do número de dados contidos em um bloco irá, consequentemente, determinar um aumento do tamanho do arquivo do modelo fazendo com que as rotinas computacionais se tornem mais demoradas e exigindo equipamentos com melhores recursos. Deste modo, deve-se ser bastante criterioso na escolha das informações pertinentes a esta fase do procedimento. Restringir as informações às absolutamente necessárias é vital para que não haja uma demora excessiva para execução do projeto.

Em geral, os blocos apresentam as mesmas dimensões nos eixos X e Y e a dimensão vertical representa a altura do banco planejado. Kim (1988) apresenta os vários tipos de modelos existentes, citando que, dentre eles, o mais usado é o modelo regular. Este foi o primeiro modelo a ser estudado e discutido, sendo o mais apropriado para utilização nos métodos automáticos de otimização.

Quanto à escolha do tamanho dos blocos, em geral, se baseia no conceito de bloco de decisão de lavra. Este conceito representa o menor bloco que permitiria sua segregação dentro dos procedimentos operacionais. Para a adoção deste conceito, deverá ser levada em consideração a malha amostral existente. A estimativa das características físicas, químicas e metalúrgicas para blocos de pequenas dimensões, em geral, deverá ter como suporte uma densidade de amostra muito grande. Assim, a despeito do uso da mais precisa técnica de determinação de cava final, os resultados poderão ser irreais. A aplicação de técnicas geoestatísticas poderá ajudar a determinar o melhor tamanho dos blocos que represente as atuais condições de conhecimento do depósito.

3.3. O MODELO GEOTÉCNICO

Dentro do procedimento de determinação de cava final, o principal fator geométrico que restringe a cava, ao lado do limite de concessão de lavra, é o ângulo de talude final. Além de representar a continuidade das operações durante toda a vida da mina, garantindo a segurança de pessoas e equipamentos, será determinante na viabilização do projeto.

Para a avaliação dos possíveis ângulos de talude da cava, tanto final quanto operacional, deverão ser realizados estudos geomecânicos detalhados dos diferentes tipos de materiais existentes. Tais estudos compreendem, entre outros, a determinação das principais estruturas geológicas, conhecimento hidrogeológico da região e ensaios geotécnicos. Partindo destas informações, o modelo poderá ser criado, indicando os ângulos de talude médios diferentes, conforme as características geotécnicas de cada setor da mina.

3.4. O MODELO DO PROJETO

Com este modelo deverão ser definidas as características do projeto que servirão de base para a sua formulação econômica. Todas as fases do processo produtivo, desde o seu início representado aqui pela lavra, até o final, carregamento do navio, por exemplo, deverão ser descritas em detalhe permitindo a estimativa de custos unitários e receitas que serão utilizados na criação do modelo econômico (valorização dos blocos). A Figura 3.4 representa um projeto em mineração, indicando os principais grupos do processo produtivo.

Em reavaliações de projetos já existentes ou na avaliação de um novo projeto onde a empresa detém um conjunto de conhecimentos compilados em empreendimentos anteriores, a estimativa de custos fica facilitada pelas informações históricas e pela própria experiência de seu corpo técnico. Por outro lado, a avaliação de projetos novos, que poderá representar um grau de incerteza maior na estimativa de custos, poderá demandar estudos para as estimativas dos custos.

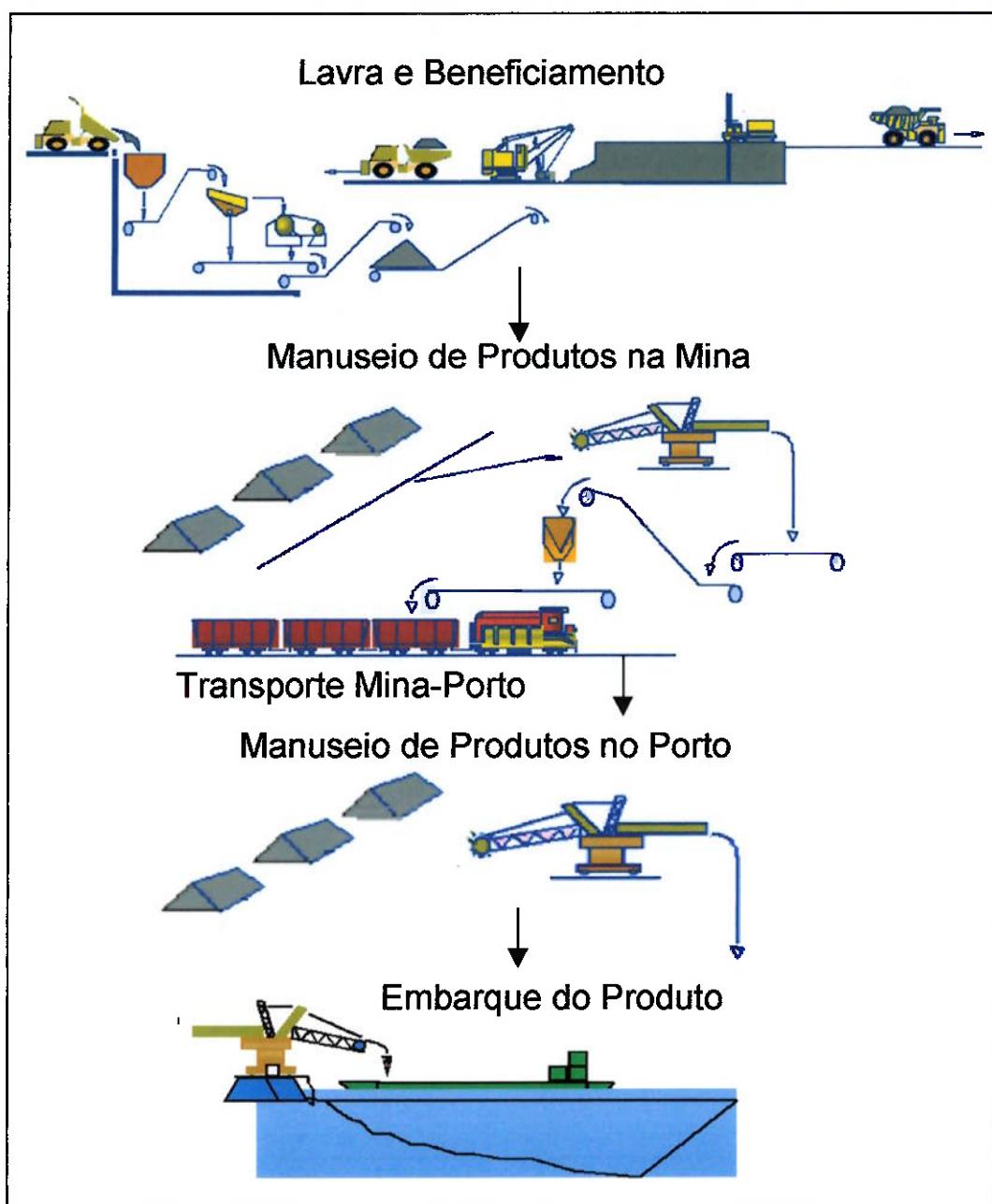


Figura 3.4 – Exemplo de fluxo de um processo produtivo

3.5. O MODELO ECONÔMICO

Considerado um dos maiores fatores de incerteza na avaliação de uma cava final, o modelo econômico de blocos utiliza as informações dos modelos anteriores, determinando, para cada bloco, seu valor econômico através da composição de suas características geológicas, de beneficiamento, da lavra e de fatores econômicos. A Figura 3.5 representa o processo produtivo da Figura 3.4 considerando os custos e receitas.

A formulação básica para um bloco contendo minério e estéril será:

$$VEB = PV * VM * R - ((CFL * VM + CFB * VM + CFE * VE) - (CMP * VP) - (CVM * VM) - (CVE * VE)) \quad (1)$$

Onde: VEB é o valor econômico do bloco;

PV é o valor de venda do produto por unidade de peso (\$/t);

VM é o número de unidades de peso de minério contido no bloco (t);

R é a recuperação no processo (%)

CFL são os custos fixos da lavra de minério por unidade de peso (\$/t);

CFB são os custos fixos do beneficiamento de minério por unidade de peso (\$/t);

CFE são os custos fixos da lavra de estéril por unidade de peso (\$/t);

CMP são os custos de movimentação entre o beneficiamento e faturamento do produto (\$/t);

CVM são os custos variáveis de lavra de minério por unidade de peso (\$/t);

CVE são os custos variáveis de lavra de estéril por unidade de peso (\$/t);

VE é o número de unidades de peso de estéril contido no bloco (t);

Cada custo e receita serão compostos através do detalhamento de cada fase do processo produtivo. Diversos fatores deverão ser considerados para a definição desta formulação conforme apresentado por Lizotte (1988).

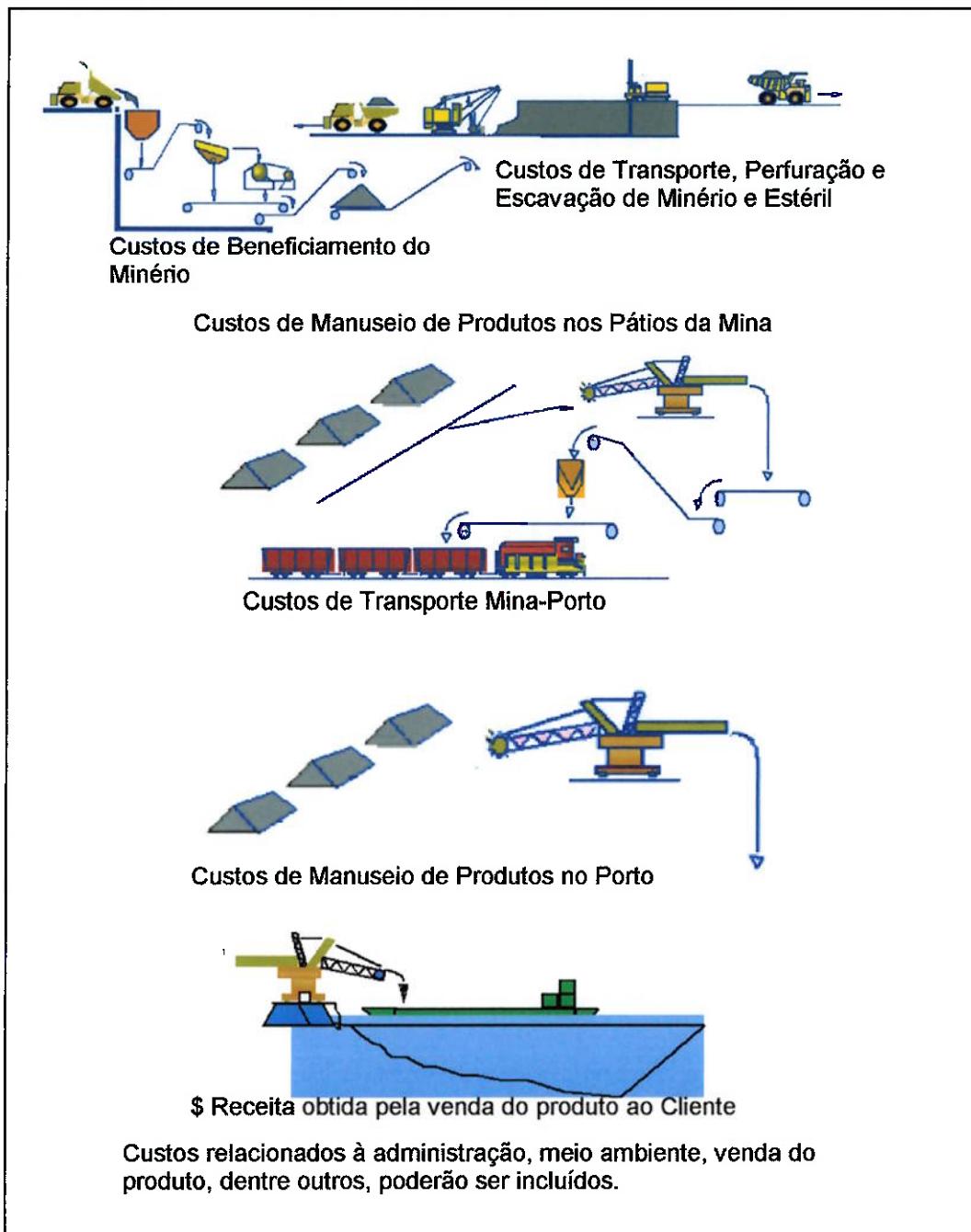


Figura 3.5 – Exemplo de Custos e Receitas dentro do processo produtivo

3.6. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE CAVA FINAL

Ao longo dos últimos 40 anos, diversas metodologias para determinação de cava final foram apresentadas.

Inicialmente, no final dos anos 50 e início da década de 60, os procedimentos eram realizados utilizando os métodos manuais baseados nas relações de lavra e econômicos, como o ‘Breakeven Stripping Ratio’ e ‘Minimum Profit Stripping Ratio’, dentre outros.

A partir do início da década de 60 foram apresentadas novas técnicas para a determinação da cava final, destacando-se a dos cones flutuantes e o algoritmo de Lerchs-Grossmann. Desde então, grande parte dos programas computacional de determinação de cava final tem se baseado nestas técnicas, adaptando-as ao enfoque tridimensional.

Em meados da década de 70, uma nova técnica foi apresentada baseando-se no conceito da parametrização das reservas, desvinculando a análise econômica da análise técnica.

3.6.1. Método dos Cones Flutuantes

Trata-se de um algoritmo de simulação que consiste na construção de um cone invertido (com as restrições de talude e fundo de cava) que caminha ao longo do modelo econômico de blocos, partindo do topo do modelo. Para cada posição do vértice do cone é calculado o somatório do valor econômico dos blocos que estão em seu interior. Todo cone positivo será lavrado e ao final da simulação todos os cones lavrados constituirão a cava final.

É um dos mais populares métodos devido à facilidade de entendimento, por sua simplicidade, apresentando menor complexidade para sua implementação computacional, em relação aos outros métodos.

A Figura 3.6 representa o fluxograma do método.

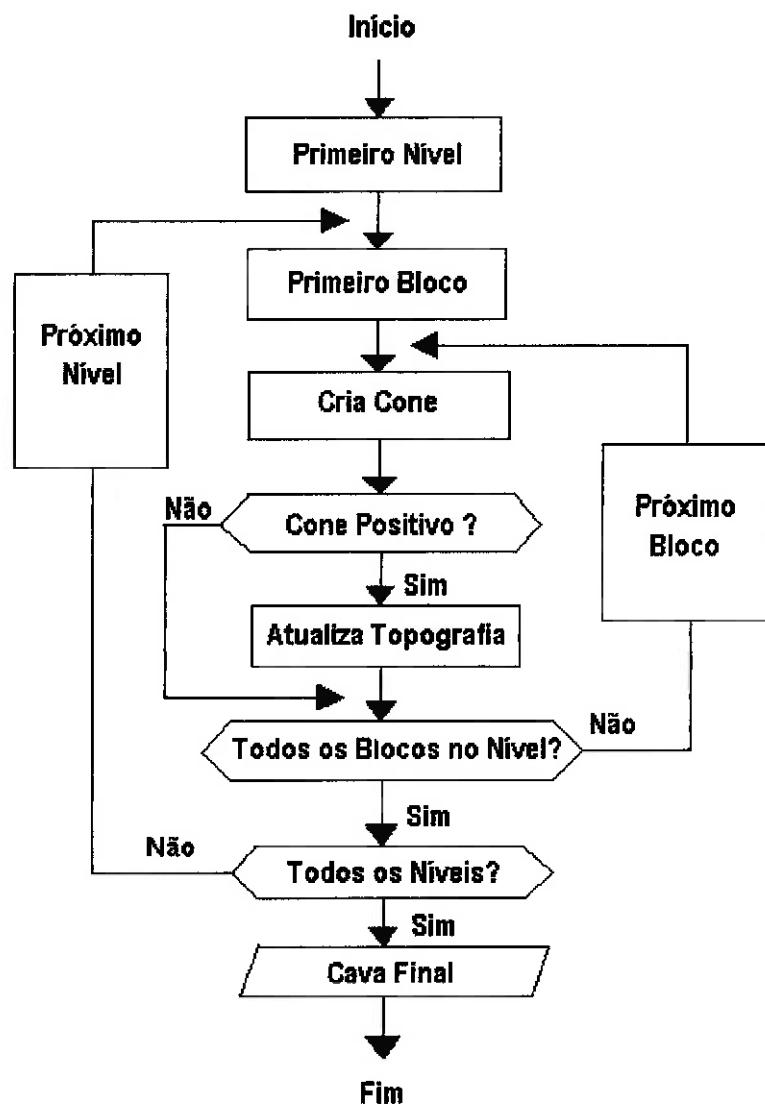


Figura 3.6 – Fluxograma do Método dos Cones Flutuantes (Adaptado de E. Alaphia Wright, 1990).

Estas características positivas podem ser irrelevantes caso sejam considerados alguns problemas apresentados por esta técnica. Lizotte (1988), Kim (1977), Hustrulid e

Kuchta (1995), discutem os principais problemas relacionados ao método, que podem levar a resultados não otimizantes, ou seja, não encontram o valor econômico máximo. A principal deficiência está na combinação de blocos, onde a remoção individual dos blocos positivos é inviável, mas a lavra em conjunto é viável.

Apesar de ser uma técnica difundida e aplicada extensivamente, nem sempre o resultado encontrado representará a cava ótima. Um exemplo de seu uso é apresentado no Anexo 01.

3.6.2. Algoritmo de Lerchs-Grossmann

Partindo da necessidade de metodologias que assegurassem um resultado realmente máximo para o valor econômico da cava final, H. Lerchs e I. Grossmann (1965) apresentaram um algoritmo baseado em programação dinâmica aplicável em duas dimensões. Apesar da validade do algoritmo desenvolvido para análise bidimensional (2D), a combinação das seções para gerar a cava final em três dimensões pode alterar significativamente esta maximização. Para a definição de modelos em 3D estes pesquisadores desenvolveram um algoritmo gráfico, utilizando a Teoria dos Grafos, que garantiria a otimização do valor econômico. Este algoritmo é representado usando uma rede onde os nós são os blocos do modelo econômico de blocos e as setas representam a precedência entre os blocos na sua ordem de extração, sob as restrições do ângulo de talude geral e sua posição espacial.

A aplicação do algoritmo de Lerchs-Grossmann pode ser realizada por diversas técnicas, como a teoria dos grafos, programação dinâmica, programação linear e fluxo de rede. Autores como Lizotte (1988), Kim (1978), Valente (1982) e Wright (1990), apresentam o histórico e alguns exemplos da aplicação destas técnicas ao algoritmo. No Anexo 02 é apresentado um exemplo da aplicação do algoritmo por programação dinâmica em 2D.

3.6.3. Parametrização Técnica de Reservas (PTR)

Este método foi desenvolvido no Centro de Geoestatística da Escola de Minas de Paris entre 1975 e 1976, e foi pioneira e inovadora na solução do problema de definição da cava final. O modelo das técnicas anteriores passa, necessariamente, pela avaliação conjunta técnico/econômica para encontrar a cava ótima. Nesta metodologia ocorre uma completa desvinculação da análise técnica (questão geométrica) da econômica. A seqüência do desenvolvimento da técnica, citada por Valente (1982), passa pelo “problema do envelope” apresentado por René Vallet (1976), pela introdução da teoria da análise convexa, por Journel (1975), Matheron (1975) e Guibal (1977), e, finalmente, o algoritmo criado por Marechal e Bongarçon (1977).

Simplificadamente, a técnica parte do princípio que todas as cavas possíveis podem ser descritas em função de três parâmetros básicos: a tonelagem de minério (T), a quantidade de metal contido (Q) e a tonelagem total (V), ver Figura 3.7.

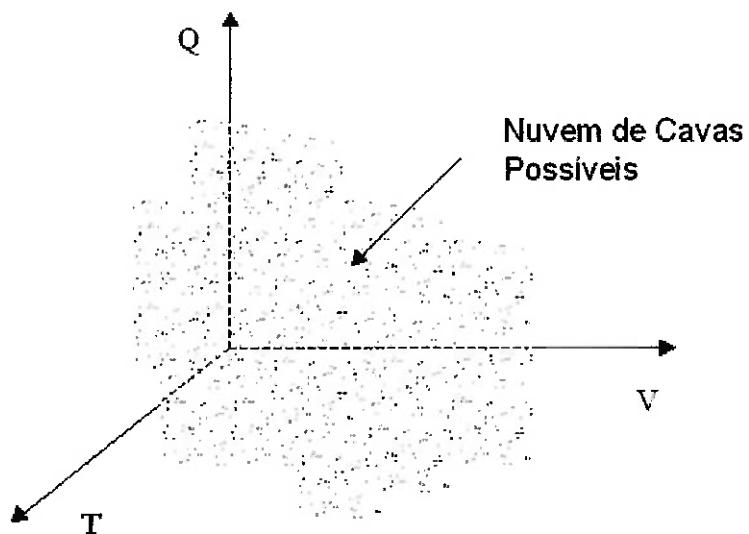


Figura 3.7 – Cavas Possíveis $f(Q, T, V)$

Somente os valores do par T e V que maximizam Q , determinarão as cavas economicamente ótimas, já que, quanto maior a quantidade de metal contido lavrado, maior sua receita e quanto menor for sua movimentação, representados por T e V , menores seus custos.

Assim, as cavas ótimas formam uma superfície côncava sobre a nuvem de pontos do gráfico $Q(T,V)$. Pela análise convexa esta superfície pode ser definida por uma função maximizante:

$$F = Q - \theta T - \lambda V$$

(2)

Para cada valor de θ e λ . Estes parâmetros, θ e λ , podem ser considerados como cortes, permitindo uma varredura nas características da jazida e são representativos do plano tangente da nuvem de pontos. A Figura 3.8 representa as cavas ótimas dentro das possíveis cavas para um projeto.

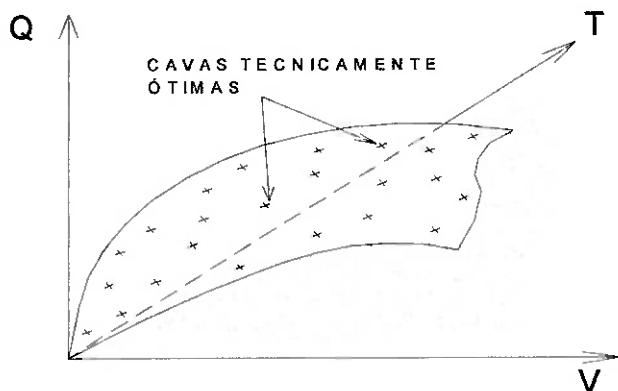


Figura 3.8 – Cavas ótimas que maximizam Q e minimizam T e V

3.7. FLUXO DE CAIXA DE UM PROJETO DE INVESTIMENTO

É bom ter presente que antes de se ter aprovado, o investimento em um novo projeto está somente no papel, porque ainda não foi realizado. O investimento é apenas um projeto e os valores monetários de seu fluxo de caixa são estimativos, as melhores possíveis de acordo com o tempo disponível, empenho dedicado e o dispêndio de dinheiro realizado.

O objetivo de um investimento é aumentar o valor de uma empresa. Ao aceitar um investimento, espera-se que os resultados futuros sejam melhores que os resultados sem o investimento. A princípio, o investimento será atraente se o fluxo de caixa da empresa com o investimento for maior que o fluxo de caixa da empresa sem o investimento. Resumindo, o VPL da empresa com o projeto deverá ser maior que o VPL da empresa sem o projeto.

Equacionando o problema:

$$FC_t = FCE \text{ com}_t - FCE \text{sem}_t$$

Segundo Lapponi, 1999, o VPL do fluxo de caixa FC_t deverá ser positivo, quando calculado a taxa mínima requerida k, isto é:

$$VPL = \sum_{t=0}^n FC_t (1 - k)^{-t} > 0$$

O fluxo de caixa do projeto de investimento obtido como o resultado do fluxo de caixa da empresa com investimento menos o fluxo de caixa da empresa sem o investimento é também denominado **fluxo de caixa incremental**.

A construção de um fluxo de caixa do projeto pode ser realizada por dois procedimentos distintos:

- 1) A partir dos fluxos de caixa da empresa com investimento e sem investimento. Este procedimento é bem trabalhoso, pois exige, primeiro, o conhecimento do fluxo de caixa da empresa sem o investimento, que nem sempre está disponível.
- 2) Considerando somente as estimativas relevantes que ocorrerão na empresa se o projeto for aprovado. Este segundo procedimento, realizado de forma incremental, é mais rápido que o primeiro, pois considera apenas as mudanças que o novo investimento provocará nos resultados da empresa.

São considerados como investimento: a aquisição de equipamentos ou outros ativos, incluindo os desembolsos para pagamentos de fretes, seguros, instalações despesas, operacionais iniciais com materiais e mão de obra, treinamento de pessoal de operação e manutenção, etc... . Resumindo, todos os desembolsos necessários para que os ativos instalados consigam operar e gerar as receitas previstas no projeto de investimento deverão ser considerados como investimento relevante.

4. METODOLOGIA

Para a elaboração desta monografia, foi desenvolvido um modelo de blocos para a jazida de N5-Sul a partir do modelo geológico cujas seções horizontais foram interpretadas a cada 30 metros. Foram admitidas as mesmas dimensões de bloco da Mina de N5E, 25m x 25m x 15m. Partindo desta premissa, um nível horizontal geológico foi usado para interpretar 02 bancos. Por esse motivo, não foi usada a topografia original, o modelo topográfico exportado para o software de otimização de cava foi criado a partir dos blocos de topo do modelo, que são os blocos limítrofes com os blocos de ar, conforme apresentado na Figura. 4.1. Esta Figura é uma vista em perspectiva do modelo topográfico da Mina de N5-Sul e suas principais características são apresentadas na Tabela 4.1.

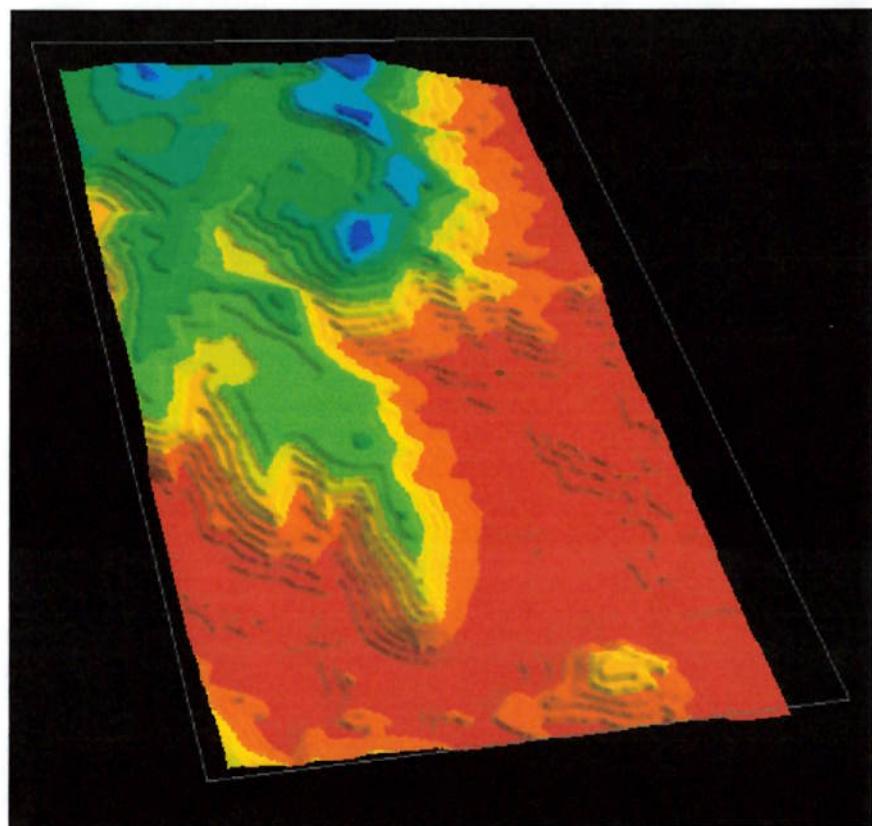


Figura 4.1 – Vista em Perspectiva do Modelo Topográfico – Topografia Original

O modelo de blocos está em coordenadas UTM.

Tabela 4.1 - Características do Modelo de Bloco

Direção	Origem (m)	Numero blocos	Dimensões bloco(m)
Leste (East)	594000	192	25.0
Norte (North)	9320000	320	25.0
Elevação (Level)	130	45	15.0

Portanto, as dimensões do modelo são:

Direção x : 4.800m

Direção y : 8.000m

Direção z : 675m

Cada bloco apresenta somente uma litologia, não ocorrendo blocos mistos de estéril e minério, sendo considerados como blocos de minério somente os de hematita. Os tipos de hematitas encontrados na Mina de N5-Sul são:

HM – Hematita Mole (Friável)

HD – Hematita Dura

Os blocos com litologia de canga de minério, embora apresentem um elevado teor de ferro, foram considerados estéreis, pois estes possuem teores de alumina e fósforo altos. Outra razão por serem considerados estéreis é que dois bancos foram interpretados a partir de um mesmo nível geológico, desta forma, a espessura da canga de minério, no modelo é de 30m, e na realidade, a espessura máxima que ela atinge é 15m.

Os outros tipos de estéril interpretados geologicamente no modelo são: a

MS - Máfica Sã;

MD - Máfica Decomposta;

JP - Jaspilito;

CQ - Canga Química;

Devido à pequena quantidade de informações de sondagens, o modelo de teores foi estimado usando variogramas ominidirecionais. O Anexo 03 apresenta os variogramas das variáveis analisadas. O modelo de blocos das variáveis químicas para as frações granulométricas, foi obtido através da correlação existente na Mina

de N5E. Este procedimento foi considerado porque não existem informações representativas e suficientes das amostras de furos de sondas.

Os teores médios das amostras de Ferro são:

Tabela 4.2 - Teores Médios da variável Ferro nas Faixas granulométricas

	Fe_Glb (%)	Fe_SF (%)	Fe_Gr (%)	Fe_NP2 (%)	Fe_NP3 (%)
HM	66,970	66,950	65,750	66,190	65,020
HD	66,900	66,500	66,830	66,710	66,870

Para efeito de nomenclatura, chamaremos fatores de recuperação, as correlações dos teores analisado da variável Fé das frações granulométricas dos furos de sonda com o teor analisado da variável Fé global. Estes fatores são multiplicados pelo teor de Fe global, estimado através de krigagem Universal. O resultado desta multiplicação é o modelo de teores das frações granulométricas. A Tabela 4.3 apresenta os fatores de recuperação das frações granulométricas.

Tabela 4.3 - Fatores de Recuperação do Ferro

	Fe_Glb (%/%)	Fe_SF (%/%)	Fe_Gr (%/%)	Fe_NP2 (%/%)	Fe_NP3 (%/%)
HM	1,000	1,000	0,982	0,988	0,971
HD	1,000	0,994	0,999	0,997	1,000

Todos os modelos foram gerados através do Software de Planejamento de Lavra e Geologia GEMCOM.

4.1 –TEORES DE CORTE

Os teores de cortes são os limites dos valores dos teores, de um conjunto de variáveis, que determina se o material é estéril ou minério.

Mesmo sabendo que, mineralizações distintas conduzem a minérios com qualidades distintas, portanto teores de cortes diferentes, foram considerados que os teores de corte para mina de N5-Sul apresentam a mesma correlação da Mina de N5E, isto é, os teores de corte são obtidos pela comparação da massa de minério do modelo de

blocos e aquela apropriada pelos registros de produção. Considerou-se esta premissa, porque a mina de N5-Sul não tem informações atualizadas para tais definições.

Tabela 4.4 – Teores de cortes aplicados ao corpo N5E

Litologia	Teores de Corte Utilizados (%)			
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃
HM e HD	>64	5		2

Foram utilizadas restrições geométricas de lavra, porque o modelo de blocos engloba também a Mina de N5E, que não é foco deste trabalho. Este recurso, conhecido como máscara, permite delimitar contornos onde os programas não poderão alterar a topografia existente e limitam a criação da cava além das bordas do modelo.

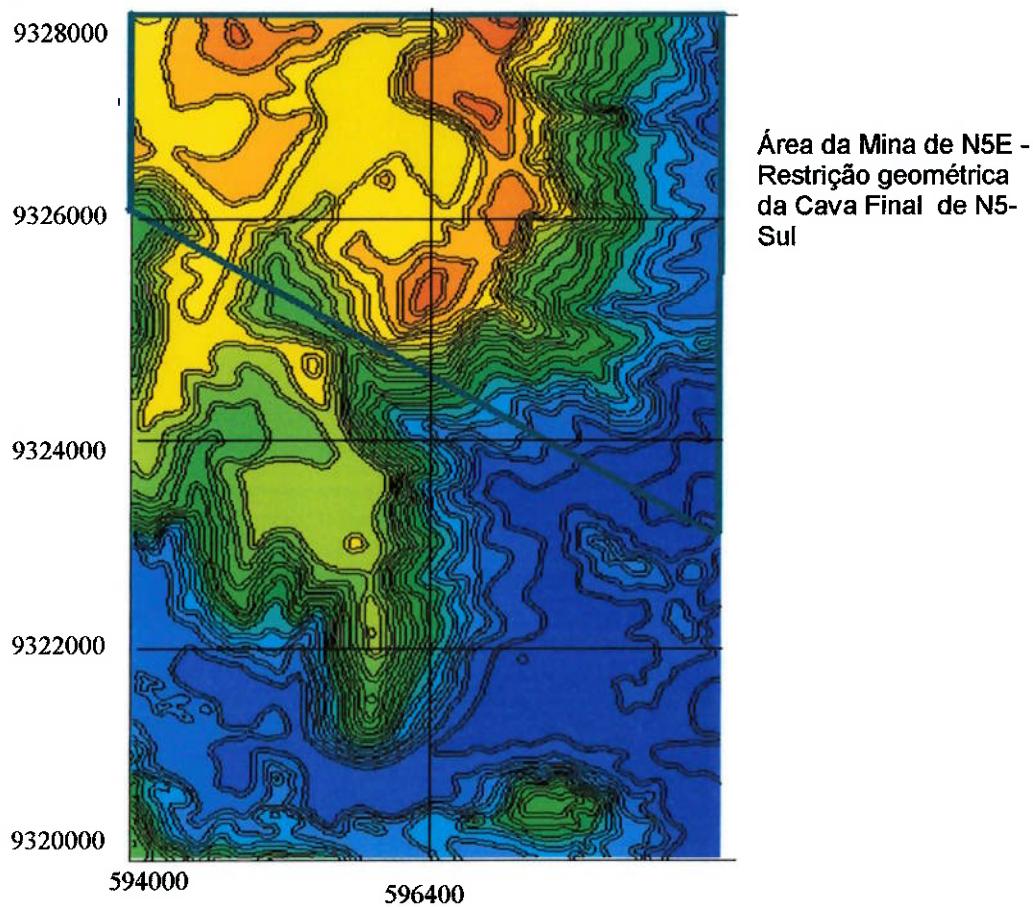


Figura 4.2 – Topografia Original com Restrições Geométrica da Cava de N5-Sul

4.2. PROGRAMA

Para a elaboração da Cava Final da Mina de N5-Sul foi utilizado o software NPV-Sheduler.

4.3. MÉTODO MATEMÁTICO DE GERAÇÃO DE CAVA

Mesmo sabendo que existem vários métodos para determinação de cava final, conforme revisão bibliográfica, a determinação da cava final da mina de N5-Sul, foi gerada através da aplicação do algoritmo de Lerchs-Grossmann;

4.3.1. Função Econômica

O Valor do Bloco foi calculado através de um pacote de planejamento de lavra denominado Gemcom e exportado para o programa NPV Sheduler.

Como ilustração será apresentado na seqüência a Função Benefício:

$$VB = RECEITA_BRUTA - (CUSTO_TOTAL_MINA + CUSTO_TOTAL_UFP)$$

onde:

VB é o valor econômico do bloco;

RECEITA_BRUTA é a receita proveniente da venda dos produtos:

- Sinter Feed
- Granulado Exportação
- Granulado Guseiro

CUSTO_TOTAL_UFP são os custos decorrentes de:

- Custo de Usina
- Custo Ferrovia
- Custo Porto
- Custo Royalty
- Custo Investimento Corrente Usina, Ferrovia e Porto.

CUSTO_TOTAL_MINA são os custos decorrentes de:

- Custo de Perfuração
- Custo de Desmonte
- Custo de carregamento
- Custo Fixo de transporte
- Custo Variável de transporte
- Custo de Rateio
- Custo de Investimento Corrente Mina

4.3.2. Ângulo de Talude Geral

Foi definido que o modelo geotécnico terá um ângulo de talude médio de 30 graus em todos os setores da mina.

4.3.3. Características do Corpo de Minério

A mina do N5-Sul apresenta uma distribuição homogênea do seu corpo de minério, aparentemente, parece ser uma continuação da Mina de N5E, mas estudos geológicos e a próxima campanha de sondagem comprovarão esta hipótese. Para efeito deste trabalho, ele será tratado com sendo uma continuação do corpo mineralizado de N5E. A Principal característica deste corpo é a sua posição espacial. Ele uma grande faixa de minério na direção Norte-Sul, com um mergulho aparente de 30 graus, com uma espessura razoavelmente constante, conforme apresentado na Figura 4.3. A seção AA' mostra o comportamento geológico do corpo de minério num corte vertical, é apresentado na Figura 4.4.

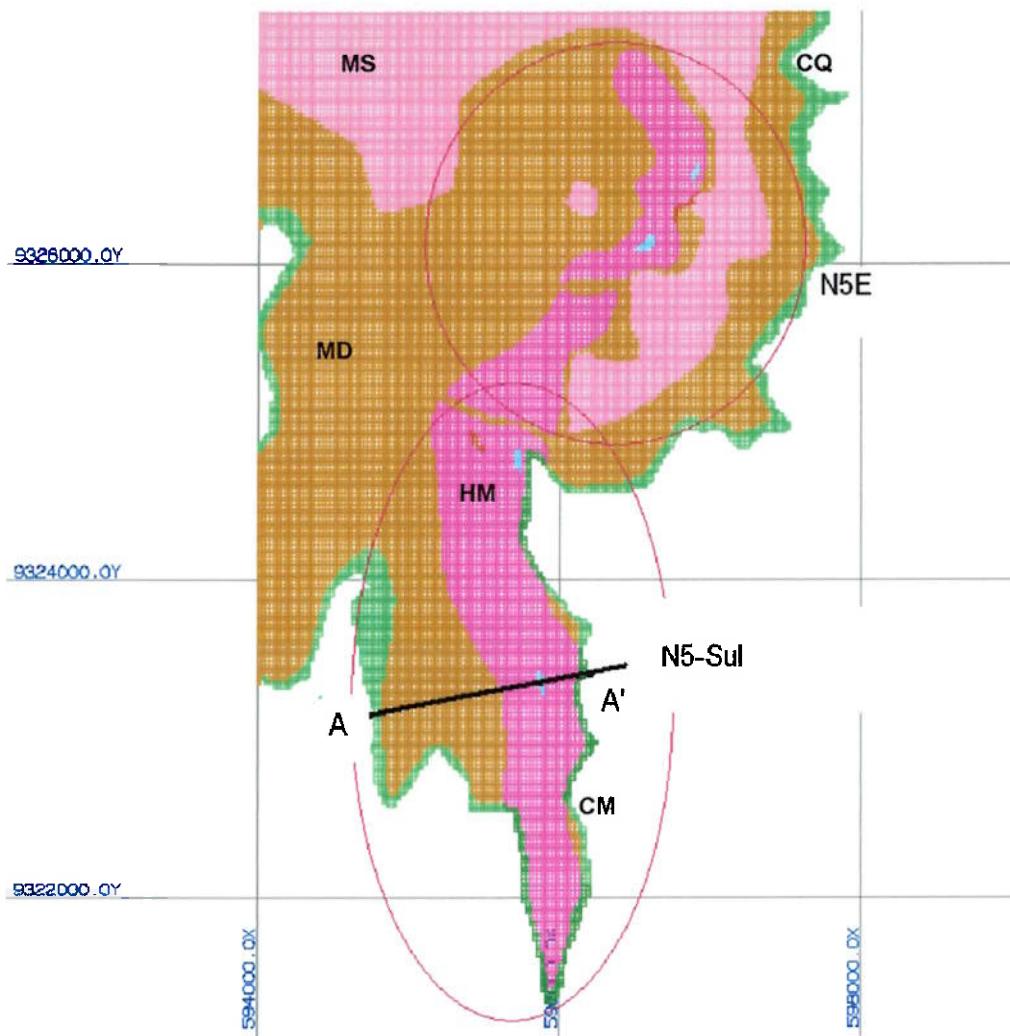


Figura 4.3 – Seção geológica horizontal - nível 520

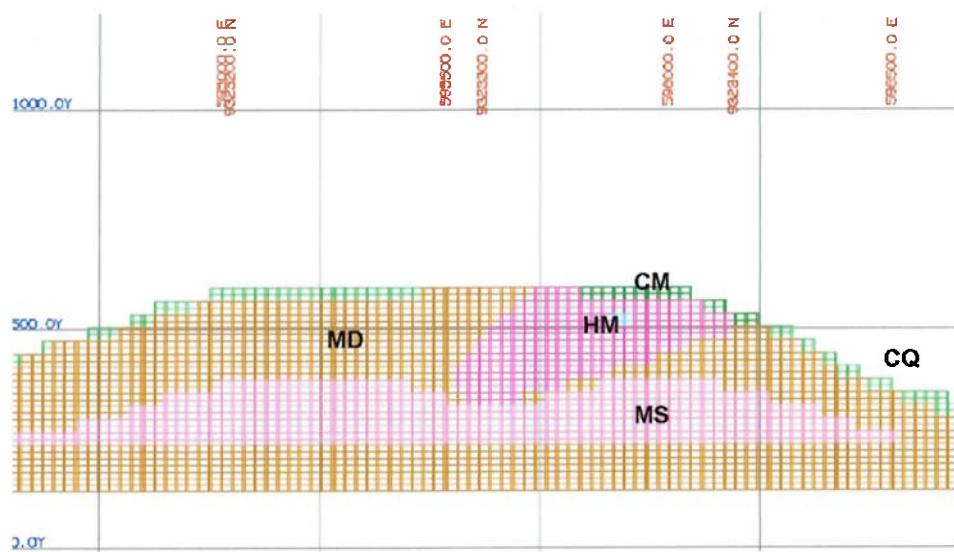


Figura 4.4 – Seção geológica vertical A – A'

A descrição da geologia regional é apresentada no Anexo 03.

4.3.4. Custos de Relocação de Britagem/transportador

Não foi considerado o custo da primeira relocação da britagem primária para a Mina de N5-Sul, isto é, após a exaustão do minério de N5E, a britagem semimóvel III (BSM III) deverá ser relocada para sul, onde será alimentada com ROM extraído da mina de N5-Sul. Devido à extensão deste corpo de minério, está prevista mais uma relocação desta britagem primária, com a finalidade de redução da distância média de transporte de minério.

O valor dos custos considerado neste estudo tem como referência a relocação da Britagem Semi Móvel II, na mina de N4E, ocorrida em 2002. O custo dos transportadores adicionais é o mesmo o valor dos transportadores da BSM III, hora em construção.

$$\text{Valor do transportador.metro (US$/m)} = 4.000,00$$

$$\text{Valor relocação do britador (US$)} = 3.000.000,00$$

Foi estimado que a britagem será relocada de aproximadamente 2.000 metros da sua posição original na Mina de N5-Sul, isto é, caso a cava final gerada abranja toda a extensão do corpo mineralizado. De acordo com esta premissa, tem-se o valor a ser investido:

Valor estimado para a mina de N5-Sul em US\$: 7.000.000,00

Caso os custos de lavra do estéril na parte norte da mina sejam superiores aos custos de relocação da BSM III, pode-se viabilizar a relocação da referida britagem, mesmo que não se tenha lavrado todo o minério ali existente. Para que esta hipótese seja válida, o VPL dos investimentos referentes à antecipação da relocação da britagem precisa ser positivo e a área sul desta mina precisa ter uma REM muito baixa.

A hipótese de se fazer uma nova relocação da BSM III para outra mina não será estudada nesta monografia, porque não se tem informação geológica dos corpos mineralizados ao sul, ex: N6, N7, ou N8.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seleção da cava ótima da Mina de N5-Sul, na presente análise, foi definida utilizando-se o critério do NPV aplicado às fases geradas pelo NPV Scheduler. Os resultados dessa implementação são mostrados na Figura 5.1 e Tabela 5.2.

É importante ressaltar que a geologia da Mina de N5-Sul foi interpretada a partir de uma malha de sondagem de 400m x 400m, com informações precedentes da década de 70 e que precisam de uma melhor acurácia para futuras decisões. Devido este problema, muitos blocos apresentam valores de teores estimados por uma quantidade muito pequena de informações.

Diferentemente de N5E, a jazida de N5-Sul é caracterizada pela predominância de HM's na sua totalidade. As reservas de HD's são muito pequenas, quase inexistentes.

Os resultados da cava ótima gerada a partir das premissas utilizadas estão apresentadas na tabela 5.1 :

Tabela 5.1 - Avaliação e Resultados da Cava Ótima

Número de blocos na cava ótima:	46.786	
Estatística da cava final		
Tonelagem total de Minério:	861,262,500 t	
Tonelagem total de Estéril:	360,258,750 t	
Lucro:	11,705,298,622 US\$	
NPV Estimado:	4,125,349,141 US\$	
REM:	0.42	
Tempo de vida da mina estimado: 6,266 dias (17.17 anos)		
Tonelagem por tipo de minério		
Hematita Mole	858,157,500 t	
Hematita dura	3,105,000 t	
Atributos		
Rec_GR - massa:	110,834,206 t	Recuperação.: 12.869 %
Rec_NP2 - massa:	69,877,148 t	Recuperação.: 8.113 %
Rec_NP3 - massa:	39,305,870 t	Recuperação.: 4.564 %
Rec_SFT -massa:	667,751,341 t	Recuperação.: 77.532 %

Pelo critério do NPV, a cava ótima é a cava que apresenta o maior valor, consequentemente terá o maior retorno financeiro. Desta forma, a cava que

apresentou o maior NPV foi a cava 25. Conforme apresentado na Tabela 5.3 e gráfico da Figura 5.1.

Tabela 5.2 - Resultados das Fases (Cavas) na determinação da Cava Ótima.

Incremental Data

Fases	NPV (US\$*1000)	Total Rocha (t)	Minério (t)	Estéril (t)	REM	HM	HD
1	370,801	52,140,000	29,295,000	22,845,000	0.78	29,295,000	0
2	347,864	53,003,437	29,556,562	23,446,875	0.793	29,556,562	0
3	362,540	52,880,625	34,061,250	18,819,375	0.553	34,061,250	0
4	500,162	53,743,125	49,522,500	4,220,625	0.085	49,522,500	0
5	391,435	53,022,187	42,692,812	10,329,375	0.242	42,692,812	0
6	326,854	53,717,812	39,786,562	13,931,250	0.35	39,786,562	0
7	317,126	50,848,125	41,268,750	9,579,375	0.232	41,268,750	0
8	163,824	44,601,562	24,092,812	20,508,750	0.851	24,092,812	0
9	142,122	43,481,250	22,552,500	20,928,750	0.928	22,552,500	0
10	89,185	40,287,187	15,722,812	24,564,375	1.562	15,722,812	0
11	60,891	40,337,812	12,293,437	28,044,375	2.281	12,293,437	0
12	76,161	40,928,437	15,606,562	25,321,875	1.623	15,606,562	0
13	32,987	36,255,937	8,340,937	27,915,000	3.347	8,340,937	0
14	143,157	50,150,625	31,123,125	19,027,500	0.611	30,515,625	607,500
15	190,143	51,952,500	43,092,187	8,860,312	0.206	42,518,437	573,750
16	26,110	38,305,312	8,166,562	30,138,750	3.691	8,166,562	0
17	142,306	49,217,812	37,897,500	11,320,312	0.299	37,897,500	0
18	172,475	53,839,687	49,545,000	4,294,687	0.087	48,127,500	1,417,500
19	154,356	53,152,500	48,488,437	4,664,062	0.096	47,982,187	506,250
20	134,424	52,005,000	47,604,375	4,400,625	0.092	47,604,375	0
21	125,923	51,989,062	48,621,562	3,367,500	0.069	48,621,562	0
22	105,078	50,355,000	44,291,250	6,063,750	0.137	44,291,250	0
23	110,150	53,460,000	50,568,750	2,891,250	0.057	50,568,750	0
24	94,913	53,361,562	47,924,062	5,437,500	0.113	47,924,062	0
25	71,192	48,484,687	39,147,187	9,337,500	0.239	39,147,187	0

A Tabela 5.3 apresenta os dados referentes a Estéril, Minério, NPV e tonelagem de rochas das fases usadas pelo NPV Scheduler quando da geração da Cava Ótima acumulada.

Tabela 5.3 - Resultados Acumulados das Fases (Cavas) na determinação da Cava Ótima.

Dados Acumulados							
Fases	NPV (US\$*1000)	Total Rocha (t)	Minério (t)	Estéril (t)	REM	HM	HD
1	370,801	52,140,000	29,295,000	22,845,000	0.78	29,295,000	0
2	718,665	105,143,437	58,851,562	46,291,875	0.787	58,851,562	0
3	1,081,205	158,024,062	92,912,812	65,111,250	0.701	92,912,812	0
4	1,581,367	211,767,187	142,435,312	69,331,875	0.487	142,435,312	0
5	1,972,802	264,789,375	185,128,125	79,661,250	0.43	185,128,125	0
6	2,299,656	318,507,187	224,914,687	93,592,500	0.416	224,914,687	0
7	2,616,782	369,355,312	266,183,437	103,171,875	0.388	266,183,437	0
8	2,780,606	413,956,875	290,276,250	123,680,625	0.426	290,276,250	0
9	2,922,728	457,438,125	312,828,750	144,609,375	0.462	312,828,750	0
10	3,011,914	497,725,312	328,551,562	169,173,750	0.515	328,551,562	0
11	3,072,805	538,063,125	340,845,000	197,218,125	0.579	340,845,000	0
12	3,148,966	578,991,562	356,451,562	222,540,000	0.624	356,451,562	0
13	3,181,953	615,247,500	364,792,500	250,455,000	0.687	364,792,500	0
14	3,325,110	665,398,125	395,915,625	269,482,500	0.681	395,308,125	607,500
15	3,515,253	717,350,625	439,007,812	278,342,812	0.634	437,826,562	1,181,250
16	3,541,363	755,655,937	447,174,375	308,481,562	0.69	445,993,125	1,181,250
17	3,683,670	804,873,750	485,071,875	319,801,875	0.659	483,890,625	1,181,250
18	3,856,145	858,713,437	534,616,875	324,096,562	0.606	532,018,125	2,598,750
19	4,010,501	911,865,937	583,105,312	328,760,625	0.564	580,000,312	3,105,000
20	4,144,925	963,870,937	630,709,687	333,161,250	0.528	627,604,687	3,105,000
21	4,270,848	1,015,860,000	679,331,250	336,528,750	0.495	676,226,250	3,105,000
22	4,375,925	1,066,215,000	723,622,500	342,592,500	0.473	720,517,500	3,105,000
23	4,486,075	1,119,675,000	774,191,250	345,483,750	0.446	771,086,250	3,105,000
24	4,580,988	1,173,036,562	822,115,312	350,921,250	0.427	819,010,312	3,105,000
25	4,652,180	1,221,521,250	861,262,500	360,258,750	0.418	858,157,500	3,105,000

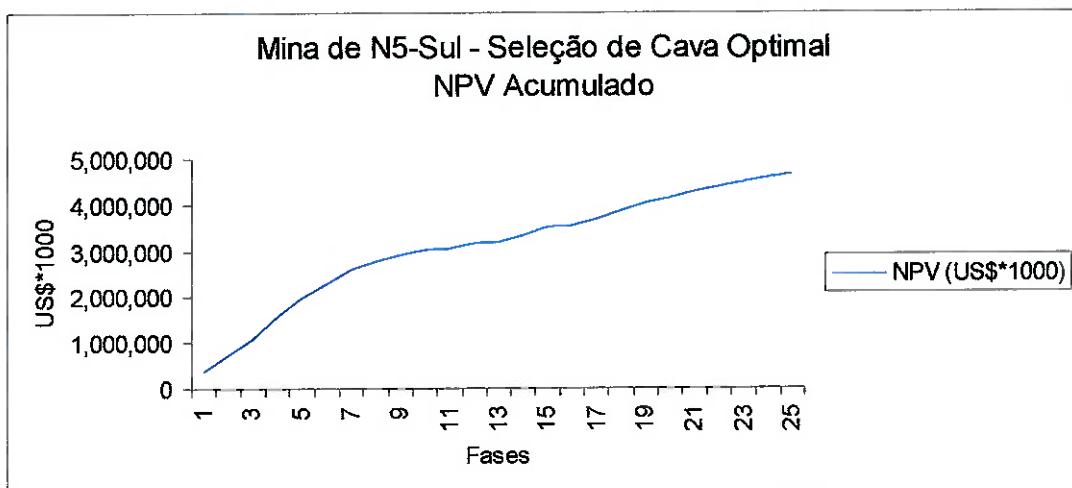


Figura 5.1 - Seleção de Cava Final - Evolução do NPV

A Figura 5.2 apresenta a evolução da REM, Minério e Estéril ao longo das fases de otimização da cava final. Note que há uma tendência de REM elevada entre as fases 13 e 19.

Este valor elevado deve-se ao fato da lavra estar sendo programada para uma região que tem uma quantidade muito grande de canga de minério. Esta canga de minério está na superfície e tem uma espessura de 30 metros, que na realidade não ocorre. Este fato se deve porque, usou-se um nível geológico para interpretar dois bancos no modelo de blocos.

Vale ressaltar que, estas fases não representam o sequenciamento de lavra, tão pouco a evolução da REM ao longo da vida da mina. Elas representam um conjunto de cavas que determinaram a cava ótima. O Sequenciamento destas cavas é feito tomando como base a topografia final da cava anterior ou a topografia original do terreno se for a primeira cava a ser gerada.

Para se determinar o sequenciamento de lavra precisamos gerar avanços operacionais de lavras, os pushbacks, também chamado de fases operacionais. Estas fases operacionais servem de base para a determinação do sequenciamento de lavra.

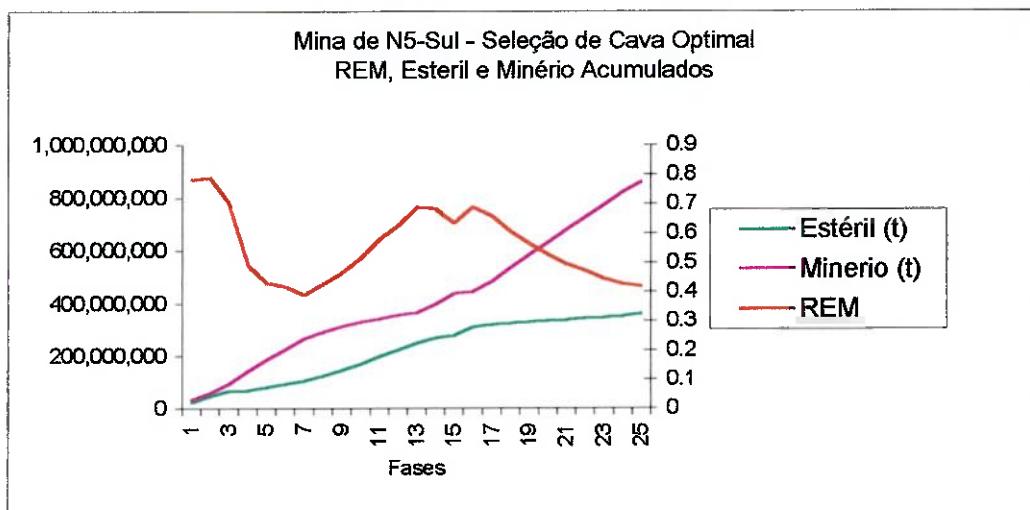


Figura 5.2 - Seleção de Cava Óptima - Evolução da REM, Estéril e Minério.

Com o objetivo de diminuir a variabilidade da REM ao longo da vida da mina, procurou-se distribuir o estéril entre os *pushbacks* (fases operacionais de lavra), mas partindo da premissa que todo o minério contido na cava óptima precisa ser lavrado. Mesmo assim, ocorreu o mesmo efeito das fases usadas pelo software NPV-Scheduler quando da geração da geração da cava óptima. A solução deste problema pode estar na reinterpretação geológica dos níveis intermediários, isto é, seções horizontais de 15m em 15m.

Contudo, ocorreu uma minimização da variabilidade da REM, com somente um ponto crítico, o mesmo apresentado anteriormente.

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam a evolução dos pushbacks ao longo da vida da mina, uma com os dados incrementais a outra com os dados acumulados.

Tabela 5.4 - Pushbacks - Dados incrementais

Pushback	NPV (US\$*1000)	Incremental Data					
		Total Rock (t)	Minério (t)	Estéril (t)	REM	HM	HD
1	763,136	83,966,250	61,031,250	22,935,000	0.376	61,031,250	0
2	930,305	131,692,500	90,326,250	41,366,250	0.458	90,326,250	0
3	458,712	64,803,750	51,702,187	13,101,562	0.253	51,702,187	0
4	1,014,983	167,417,812	139,180,312	28,237,500	0.203	139,180,312	0
5	326,044	60,175,312	53,358,750	6,816,562	0.128	53,358,750	0
6	255,337	99,267,187	52,050,937	47,216,250	0.907	52,050,937	0
7	193,227	175,410,000	55,887,187	119,522,812	2.139	55,887,187	0
8	480,827	177,424,687	150,364,687	27,060,000	0.18	147,259,687	3,105,000
9	239,304	103,175,625	96,429,375	6,746,250	0.07	96,429,375	0
10	101,947	54,883,125	47,255,625	7,627,500	0.161	47,255,625	0
11	79,476	81,551,250	42,867,187	38,684,062	0.902	42,867,187	0
12	36,958	21,753,750	20,808,750	945,000	0.045	20,808,750	0

Tabela 5.4 - Pushbacks - Dados acumulados

Pushback	NPV (US\$*1000)	Dados Acumulados					
		Total Rock (t)	Minério (t)	Estéril (t)	REM	HM	HD
1	763,136	83,966,250	61,031,250	22,935,000	0.376	61,031,250	0
2	1,693,441	215,658,750	151,357,500	64,301,250	0.425	151,357,500	0
3	2,152,153	280,462,500	203,059,687	77,402,812	0.381	203,059,687	0
4	3,167,137	447,880,312	342,240,000	105,640,312	0.309	342,240,000	0
5	3,493,180	508,055,625	395,598,750	112,456,875	0.284	395,598,750	0
6	3,748,517	607,322,812	447,649,687	159,673,125	0.357	447,649,687	0
7	3,941,744	782,732,812	503,536,875	279,195,937	0.554	503,536,875	0
8	4,422,571	960,157,500	653,901,562	306,255,937	0.468	650,796,562	3,105,000
9	4,661,875	1,063,333,125	750,330,937	313,002,187	0.417	747,225,937	3,105,000
10	4,763,822	1,118,216,250	797,586,562	320,629,687	0.402	794,481,562	3,105,000
11	4,843,298	1,199,767,500	840,453,750	359,313,750	0.428	837,348,750	3,105,000
12	4,880,257	1,221,521,250	861,262,500	360,258,750	0.418	858,157,500	3,105,000

Da mesma forma como as fases usadas na determinação da cava ótima, foram feitos gráficos mostrando a evolução da REM, Estéril, Minério e NPV, conforme mostrado nas Figuras 5.3 e 5.4.

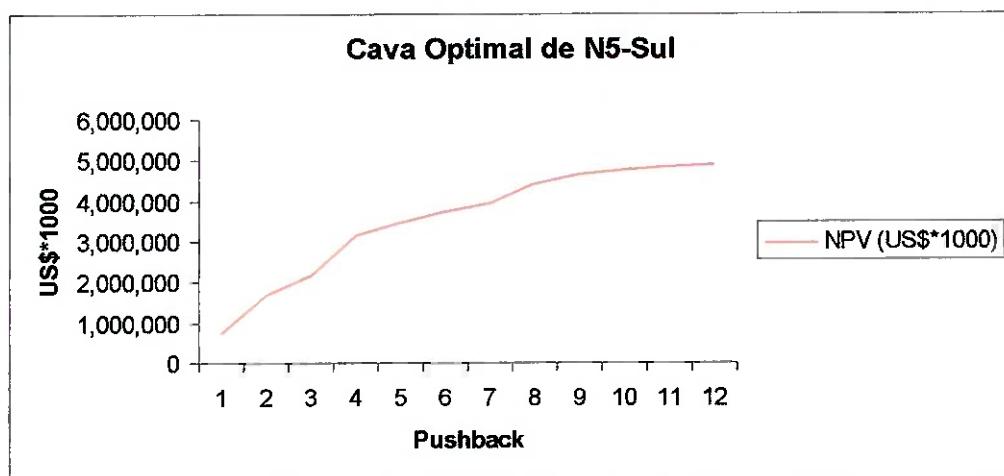


Fig. 5.3 - Evolução do NPV nos pushbacks.

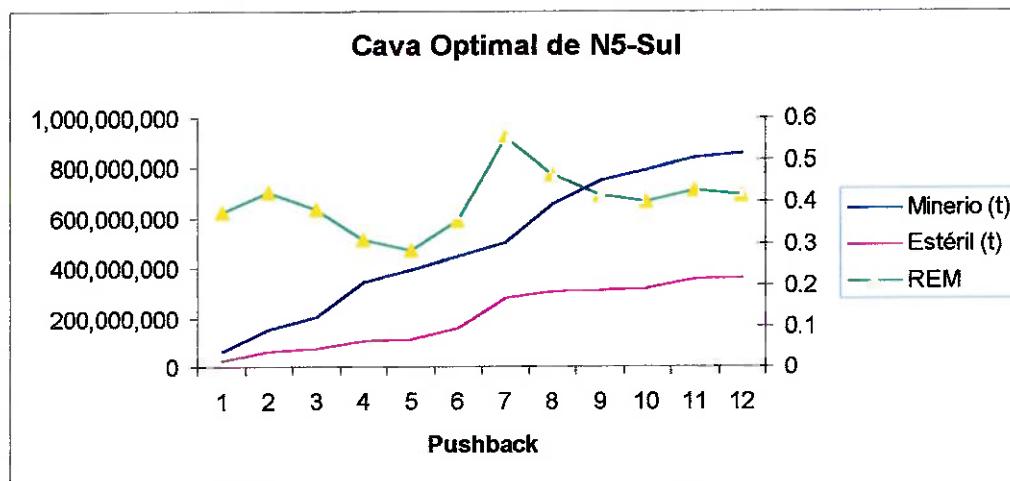


Fig. 5.4 – Evolução Acumulada da REM, Estéril e Minério nos pushbacks.

As Figuras de 5.5 e 5.6 apresentam a primeira e ultima topografia gerada pelo NPV durante a etapa de pushbacks.

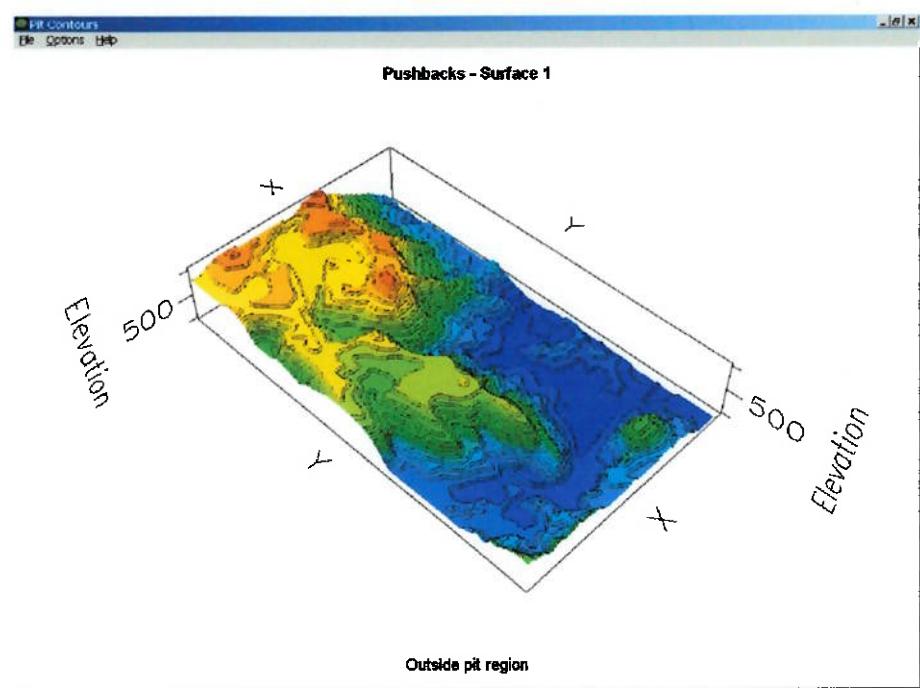


Figura 5.5 - Pushback 1 - Topografia Original

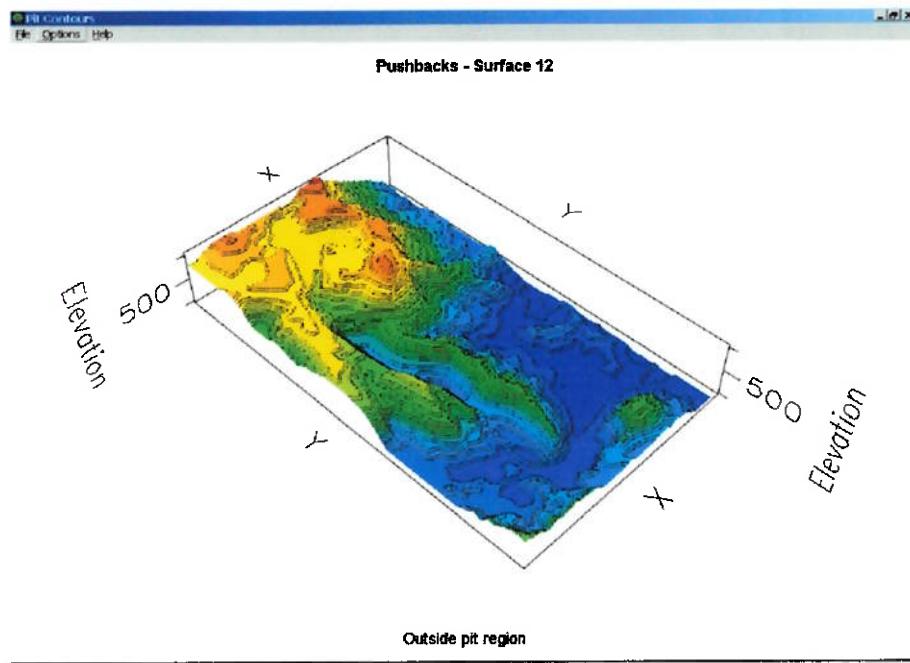


Figura 5.6 - Pushback 12 - Cava Final

A Figura 5.7 apresenta o nível 520 do modelo de blocos com a posição das seções geológicas. Fazendo uma analogia ao sistema de coordenadas, o nome de cada seção vertical está relacionado ao sistema de coordenadas locais utilizadas pela CVRD-Carajás.

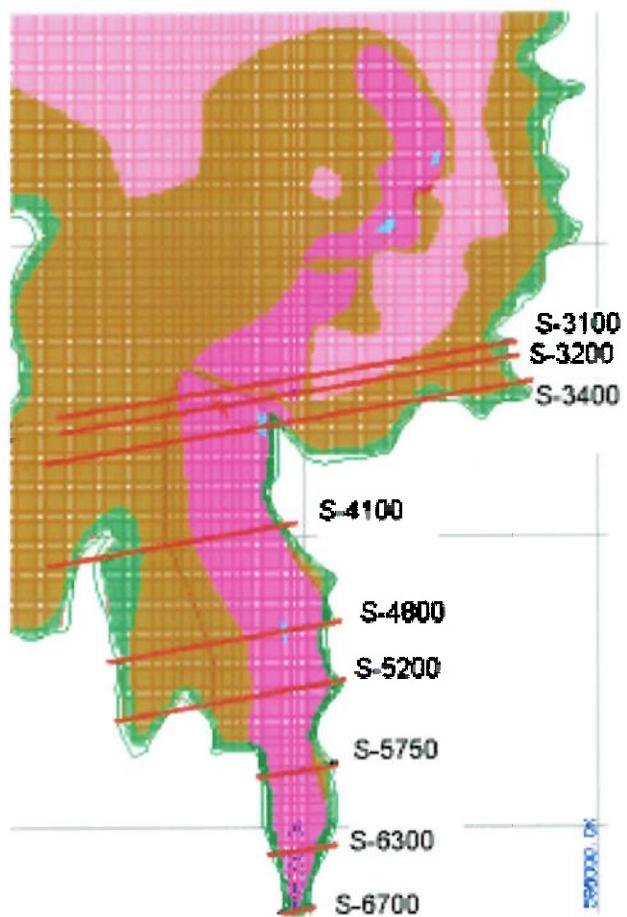


Figura 5.7 – Modelo de Blocos – Nível 520

Este fato se deve porque o modelo de blocos tem como referência o sistema de coordenadas UTM e caso tenhamos que fazer qualquer comparação com o modelo da Mina de N5E, que está em coordenadas locais, a comparação visual se torna mais fácil.

As Figuras 5.8 a 5.14 apresentam as seções verticais com o modelo de Rock Type interceptado pelas superfícies original e cava final. Pode-se verificar que a forma do corpo mineralizado aliado à superfície original tem a gerar uma cava com uma REM baixa.

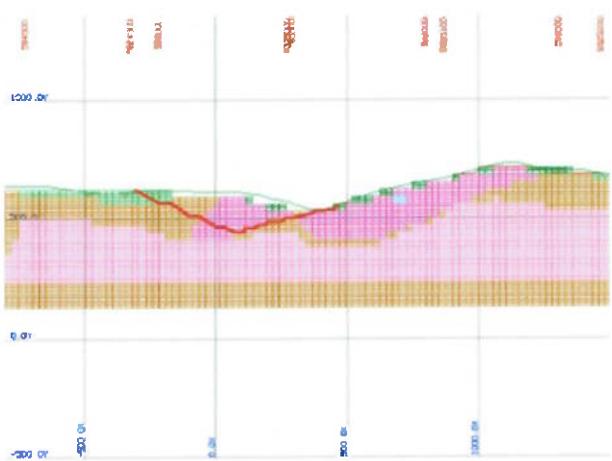


Figura 5.8 – Seção Vertical S-3100

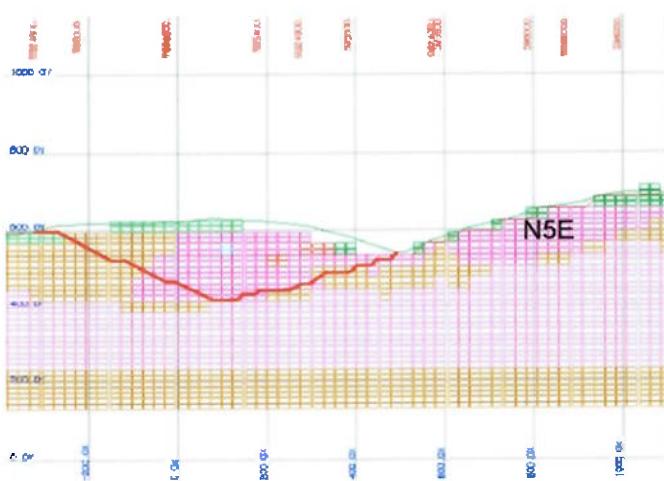


Figura 5.9 – Seção Vertical S-3200

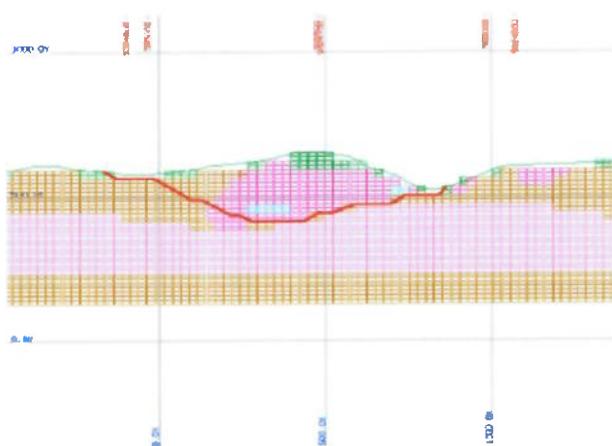


Figura 5.10 – Seção Vertical S-3400

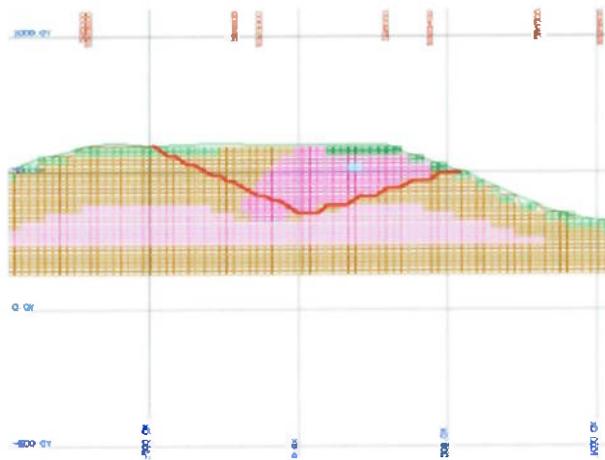


Figura 5.11 - Seção Vertical – S-4800

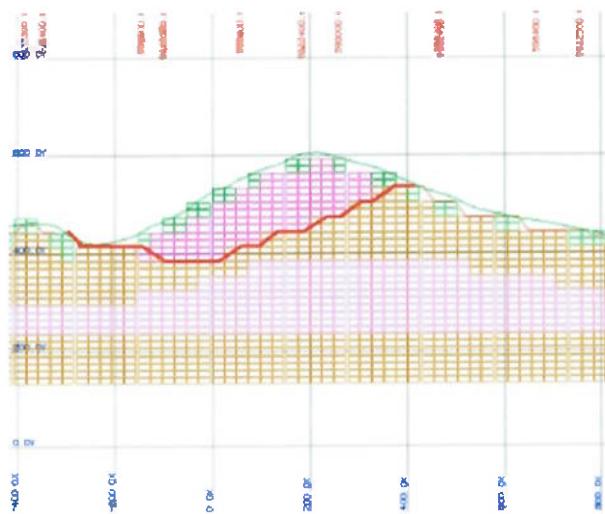


Figura 5.12 – Seção Vertical S-5750

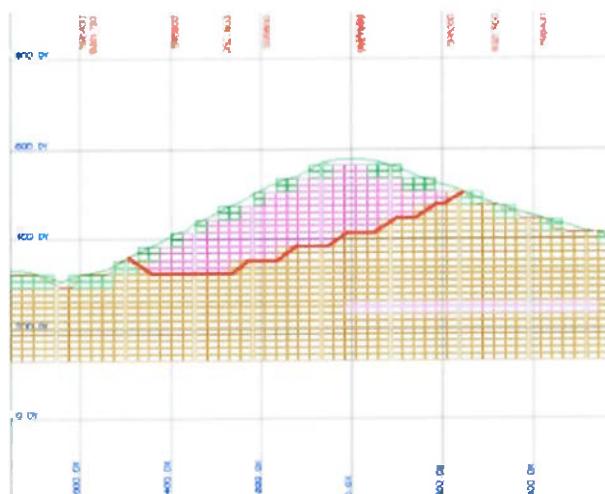


Figura 5.13 – Seção Vertical – S –6300

O ângulo de talude baixo usado pelo NPV-Scheduler na geração da cava ótima deveria proporcionar uma REM alta, mas isso não ocorre, também em decorrência dos fatos citados anteriormente. Acredita-se que a REM não irá aumentar quando a cava for operacionalizada, porque, com um ângulo de talude bem baixo fica fácil fazer os ajustes necessários, sem ter que acrescentar estéril em função dos acessos.

Para verificar a variação do NPV em relação a REM, foram geradas 10 cavas com 10 diferentes ângulos de talude. Os 10 ângulos de taludes compreendem o intervalo de 26 graus a 46 graus, que são dos dois casos extremos. Desta forma, partindo da situação mais conservadora cujo ângulo de talude é de 26 graus foram geradas as cavas até a melhor situação, neste caso considerando um ângulo de talude de 46 graus. Cada cava foi gerada a cada 2 graus.

As cavas foram geradas através do software NPV Scheluler, porque dependendo da posição espacial do bloco de estéril, este tem um valor econômico. Portanto, blocos próximos ao depósito tem um valor econômico maior que blocos localizados distantes dos depósitos, em outras palavras, o custo de lavra de um bloco localizado próximo ao depósito é menor que o localizado distante, porque a distância média de transporte deste bloco é maior.

A quantidade de minério não teve muita variação, permanecendo praticamente constante, variando somente o estéril contido em cada cava.

Esta análise de sensibilidade se fez necessário para verificar qual era o comportamento do NPV diante diferentes situações de REM, já que procurou gerar as cavas com uma quantidade de minério igual.

O resultado desta análise de sensibilidade é apresentado na Figura 5.14.

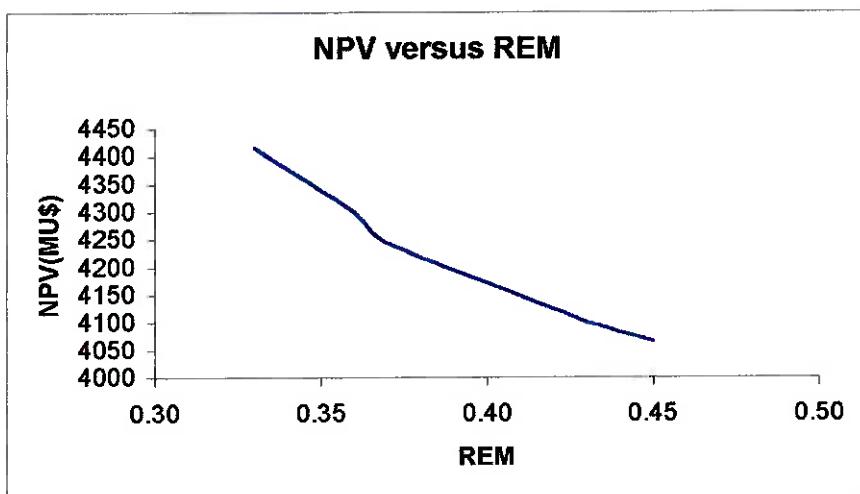


Figura 5.14 - Correlação NPV versus REM

Observa-se nesta análise, que o maior valor do NPV encontrado é para a cava que apresenta uma REM de 0,33 e estamos considerando a cava ótima a que apresenta uma REM de 0,418. Este resultado só foi possível porque estas cavas foram geradas com diferentes ângulos de taludes e a de REM de 0,33 foi gerada com um ângulo de talude médio de 46 graus.

Uma pequena variação da quantidade de minério na cava ótima tem praticamente o mesmo resultado no NPV que uma grande variação na quantidade de estéril.

Quanto maior a quantidade de minério maior será o NPV do projeto, isto ocorre porque o minério de ferro produzido pela DIFN tem um alto valor agregado. Os custos de produção são muito competitivos.

O crescimento do NPV do projeto é inversamente proporcional ao aumento da REM, mas este crescimento não é linear.

6. CONCLUSÃO

Com base nas informações existentes e as premissas estabelecidas, a cava ótima gerada pelo NPV-Sheduler apresenta uma relação estéril minério de 0,418. Nenhuma mina de ferro na região de Carajás, hora em lavra, apresenta esta REM tão baixa. Também , de acordo com estas premissas, tem-se ainda uma grande possibilidade de redução da REM casos alguns parâmetros sejam mais bem definidos, a saber:

- Modelo geotécnico;
- Interpretação de todos os níveis do modelo geológico;
- Definição da quantidade de canga de minério que é realmente estéril.

Como o valor agregado do minério de ferro produzido pela DIFN é muito alto e a quantidade de minério contido na cava da mina de N5-Sul é muito grande o NPV também é. Desta forma, para justificar uma relocação do britador para uma outra mina ou região da cava, a REM teria que ser muito alta.

Diane destes fatos, torna-se inviável a relocação da britagem para uma outra mina que tenha uma REM baixa antes que todo o minério contido na cava ótima seja lavrado.

Como a Mina de N5-Sul é muito extensa, se fará necessário a relocação da britagem para sul. A seqüência de lavra ótima é iniciar a lavra de Norte para Sul. Mesmo assim, a metodologia de se lavrar o minério com a REM baixa e direcionar a lavra para outra região da mina à medida que a REM atinja um patamar alto, é inviável. O desenvolvimento do estéril se faz necessário para atingir o minério, aproximadamente 65% deste é canga de minério, que está na superfície.

Portanto, uma ótima opção para a Mina de N5-Sul é lavrar todo o minério contido na cava ótima, através de uma seqüência de lavra de Norte para Sul. À medida que as áreas ao norte chegarem ao limite da cava final , o estéril a ser lavrado na região sul poderia ser depositado dentro da cava, na região norte, evitando que a área de floresta adjacente à mina seja transformada em depósito de estéril .

Este procedimento estará de acordo com a Política Ambiental da CVRD.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar alternativas de lavra que viabilizam a deposição de estéril na cava de N5E , minimizando os impactos ambientais decorrentes da mineração. Esta prática poderá viabilizar junto ao IBAMA e DNPM a abertura da mina de N5-Sul.
- Refazer este estudo quando da posse das novas informações da Mina de N5-Sul e outros corpos mineralizados Adjacentes.
- Aplicar esta metodologia para a Mina de N4W-Central e N4W-Sul.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Casarotto, N. F. e Kopittke, B.H., **Análise de Investimentos**, São Paulo, Editora Atlas, 2000

Earthworks, **2001:NPV Scheduler Tutorial**, Earthworks Corporation, Londres, UK, Setembro, 2001

Gomide, M.D., **Comparação entre Métodos de Determinação de Cava Final**, Tese mestrado Universidade de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2001.

Hustrulid, W. e Kutchta, M., **Open Pit Mine Planning and Design**, Rotterdam, A. A. Balkema Publishers, 1995, v 1.

Journel, A. G., **Convex Analysis for Mine Scheduling**, ASI-Geostat-75, Roma, Itália, 1975.

Kim, Y.C. **Ultimate Pit Limit Design Methodologies Using Computer Models – The State of the Art**. Mining Engineering p. 1454-1459, out-1978.

Lapponi, J.C., **Projetos de Investimentos**, São Paulo, Lapponi Treinamento e Editora Ltda, 1999.

Lerchs, H., and Grossmann, L., 1965, **Optimum Design of Open-Pit Mines**, Trans, C.I.M, Vol. LXVIII, p. 17-24.

Lizotte, Y. **The Economics of computerized open pit design**. International Journal of Surface Mining p. 59-78, set-1988.

Valente, J.M.G.P., **Geomatématica – Lições de Geoestatística**. Ouro Preto, Fundação Gorceix, 1982. V. 5.

Vallet, R., **Optimisation Mathématique de L'exploitation d'une Mine à Ciel Ouvert ou le Problème de L'enveloppe**. Annales des Mines de Belgique. 1976. p. 113-136.

Wright E. A., **Open Pit Mine Design Models**, Alemanha, trans Tech Publications, 1990, V 1

9. BIBLIOGRAFIA

Alford C. G. e Whittle, J. **Application of Lerchs-Grossmann Pit Optimization to the Design of Open Pit Mines**, Large Open Pit Mine Conference, Out-1986.

Coléou, T., **A Geoestatistical Approach to the Optimization Problems**, Large Open Pit Mine Conference, Out-1986.

Coléou, T. **Technical parameterization of reserves for open pit design and mine planning**. International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, 21., Las Vegas, 1989, Application of computers and operations research in the mineral industry. Littleton, AIME, 1989. p. 485-494.

François-Bongarçon, D., **Myth and Reality: A Status Report on Computer Open Pit Optimization Algorithms in the 90's**, Jun-1993.

François-Bongarçon, D. e Laille, J. P., **Parameterization of The Reserves of an Open-Pit: A Complete Case Study.**, Geostatistics for Natural Resources Characterization, Part2, p. 1045-1056, 1984

Johnson, T.B.; Sharp, W.R. **A Three-Dimensional Dynamic Programming Method for Optimal Ultimate Pit Design**. Washington, U.S.Department of the Interior, Bureau of Mines, 1971. (U.S.Bureau of Mines. Report of Investigations, 7553).

Korobov, S., **Method for determining optimal ultimate open pit limits**. Rappot Technique EP 74, Ecole Polytechnique de Montréal, dez-1973

Whittle, J., 1988, **Beyond Optimization in Open Pit Design**, Proc, 1st. CAMI.

Whittle, J., 1989, **The Fact and Fallacies of Open Pit Design**, Whittle Programming Pty Ltd.

Anexos

ANEXO 01 - Aplicação Método dos Cones Flutuantes

O conceito da técnica dos cones flutuantes é muito simples, sendo neste exemplo utilizada uma seção vertical de um modelo econômico de blocos (figura 10.1), contendo o valor de cada bloco, com 5 linhas e 10 colunas (5,10).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-2	-1	-2	3	-3	-1	-3	-2	-2	-2
2	-2	1	-2	7	-2	-3	-2	2	-3	-1
3	-1	-2	2	8	5	-3	5	-3	-2	-1
4	-4	-3	2	-3	0	-3	2	-1	-3	-2
5	-5	-4	-1	4	8	-2	-2	-2	-1	-1

Figura 10.1 – Seção com blocos do modelo econômico

Inicia-se a simulação da lavra na linha 1. O primeiro bloco positivo encontrado tem valor 3 (1,4), não ocorrendo nenhum bloco acima dele. O bloco será lavrado e a nova configuração é representada na figura 10.2, e o valor acumulado da cava é de 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-2	-1	-2	X	-3	-1	-3	-2	-2	-2
2	-2	1	-2	7	-2	-3	-2	2	-3	-1
3	-1	-2	2	8	5	-3	5	-3	-2	-1
4	-4	-3	2	-3	0	-3	2	-1	-3	-2
5	-5	-4	-1	4	8	-2	-2	-2	-1	-1

Figura 10.2 – Lavra do bloco (1,4)

Não existindo mais blocos positivos na linha 1, segue-se para a linha 2. O primeiro bloco positivo é de valor 1 (2,2). A precedência de lavra determina que para lavrar este bloco é necessária a lavra dos blocos (1,1), (1,2) e (1,3). A somatória dos valores destes blocos é de -5, tornando inviável a lavra do bloco (2,2). Seguindo na linha 2, o

próximo bloco positivo (2,4) tem valor 7. A precedência dos blocos determina a lavra dos blocos (1,3) e (1,5), sendo que o bloco (1,4) já tendo sido lavrado não será incluído. O valor total dos blocos é de 2, sendo viável a lavra. A nova configuração é apresentada na figura 10.3 e a cava total parcial apresenta valor de 5.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-2	-1	X	X	X	-1	-3	-2	-2	-2
2	-2	1	-2	X	X	-2	-3	-2	2	-3
3	-1	-2	2	8	5	-3	5	-3	-2	-1
4	-4	-3	2	-3	0	-3	2	-1	-3	-2
5	-5	-4	-1	4	8	-2	-2	-2	-1	-1

Figura 10.3 – Lavra do bloco (2,4)

Na linha 2 o valor positivo 2 ((2,8) é inviável por apresentar blocos precedentes negativos de -7.

Na terceira linha o bloco (3,3) de valor 2 é inviável pois deste bloco mais a dos blocos (1,1), (1,2), (2,2) e (2,3) determinam um valor total de -2. O bloco de valor 8 (3,4) será lavrado pois os blocos precedentes apresentam somatória negativa de -6, permitindo um saldo de 2. A nova geometria tem valor total de +7, sendo representada na figura 10.4.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-2						-3	-2	-2	-2
2	-2	1					-3	-2	2	-3
3	-1	-2	2			5	-3	5	-3	-2
4	-4	-3	2	-3	0	-3	2	-1	-3	-2
5	-5	-4	-1	4	8	-2	-2	-2	-1	-1

Figura 10.4 – Lavra do bloco (3,4)

A lavra dos blocos (3,5) e (3,7) são inviáveis , pois seus cones de extração tem valor -1 e -3. Neste ponto é importante salientar a necessidade de que a cada atualização da geometria, ocorra um retorno da análise dos blocos positivos anteriormente não viáveis. Caso isto não seja feito, o bloco (3,3) que foi definido como inviável na primeira passagem de sua linha, continuará sendo indicado como inviável, quando na verdade, após a lavra do bloco (3,4), passou a ser viável. A nova geometria passa a ser a da figura 10.5, com a cava apresentando valor total de 8.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1							-3	-2	-2	-2
2	-2						-3	-2	2	-3
3	-1	-2				5	-3	5	-3	-2
4	-4	-3	2	-3	0	-3	2	-1	-3	-2
5	-5	-4	-1	4	8	-2	-2	-2	-1	-1

Figura 10.5 – Lavra do bloco (3,3)

A simulação dos cones dos blocos positivos que restaram apresentam inviabilidade. Bloco (4,3) com valor -1, (4,7) com valor -14, (5,4) com valor -4 e bloco (5,5), com valor -1, determinando a cava final com valor 8.

Ocorre que uma das imperfeições do método esta ligada à combinação de blocos. Na linha 5 temos dois blocos adjacentes, (5,4) e (5,5) que não apresentaram viabilidade individualmente, mas a combinação destes dois blocos indicam um cone positivo de 1, devendo ser incluídos na representação da cava final, gerando um valor total de 9.

A cava final real é apresentada na figura 10.6.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-2	-1	-2	3	-3	-1	-3	-2	-2	-2
2	-2	1	-2		-2	-3	-2	2	-3	-1
3	-1	-2	2		8	+ 95	-3	5	-3	-2
4	-4	-3	2	-3	0	-3	2	-1	-3	-2
5	-5	-4	-1	4	8	-2	-2	-2	-1	-1

Figura 10.6 – Configuração da cava final – Cones Flutuantes

ANEXO 2 - Aplicação do Algoritmo de Lerchs-Grossmann por Programação Dinâmica em Duas Dimensões

Sobre o mesmo modelo de blocos do apêndice 1 será realizada a exemplificação da determinação do contorno de cava final a para a seção.

Inicialmente deverá ser realizada a acumulação dos valores das colunas e inserida uma linha com blocos de valor 0 antes do primeiro nível (figura 10.7).

A fórmula de acumulação dos valores dos blocos é:

$$M_{ij} = \sum_{K=1}^i m_{kj} \quad (4)$$

Onde M_{ij} é o valor econômico da extração dos blocos da coluna, sendo o bloco (i,j) a base do cone e m_{kj} é o valor do bloco (k,j) .

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-	-2	-1	-2	3	-3	-1	-3	-2	-2	-2
2	-	-4	0	-4	10	-5	-4	-5	0	-5	-3
3	-	-5	-2	-2	18	0	-7	0	-3	-7	-4
4	-	-9	-5	0	15	0	-10	2	-4	-10	-6
5	-	-14	-9	-1	19	8	-12	0	-6	-11	-7

Figura 10.7 – Acumulação dos valores econômicos dos blocos

O próximo passo do procedimento será a comparação entre os valores adjacentes à esquerda de cada bloco e a soma do maior valor ao do bloco analisado. Este novo valor do bloco é atualizado no modelo e passa-se ao bloco seguinte. Este procedimento é realizado na coluna, iniciando da coluna 1.

A fórmula que descreve este procedimento é:

$$P_{ij} = M_{ij} + \text{Máximo}((P_{i-1,j-1}), (P_{i,j-1}), (P_{i+1,j-1})) \quad (5)$$

Onde P_{ij} é o novo valor do bloco (i,j) , M_{ij} é o valor do bloco analisado e $\text{Máximo}((P_{i-1,j-1}), (P_{i,j-1}), (P_{i+1,j-1}))$ é o maior valor entre os blocos adjacentes à esquerda do bloco analisado.

Após análise do bloco é colocada uma seta ligando o bloco analisado ao bloco de maior valor.

Exemplificando (figura 10.8):

Para o bloco $(2,5)$, de valor -5 , teríamos os blocos adjacentes $(1,4)$, $(2,4)$ e $(3,4)$. O

maior valor dentre estes blocos é 18, do bloco (3,4). O novo valor P do bloco (2,5) será 13.

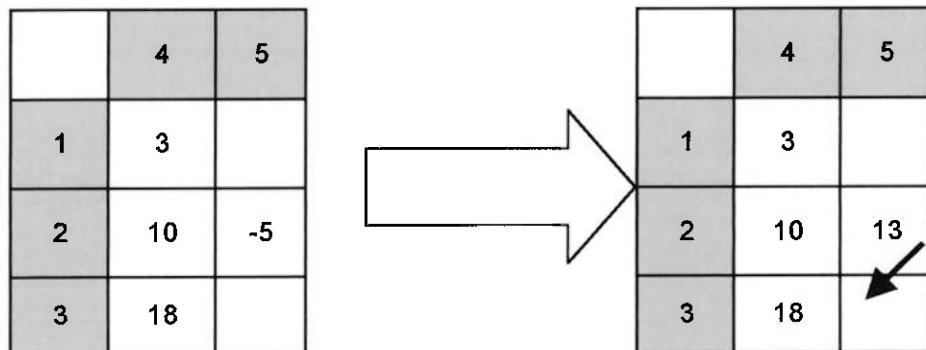


Figura 10.8 – Análise dos blocos adjacentes

A aplicação deste procedimento ao modelo acumulado da figura 6.7 é apresentada na figura 10.9

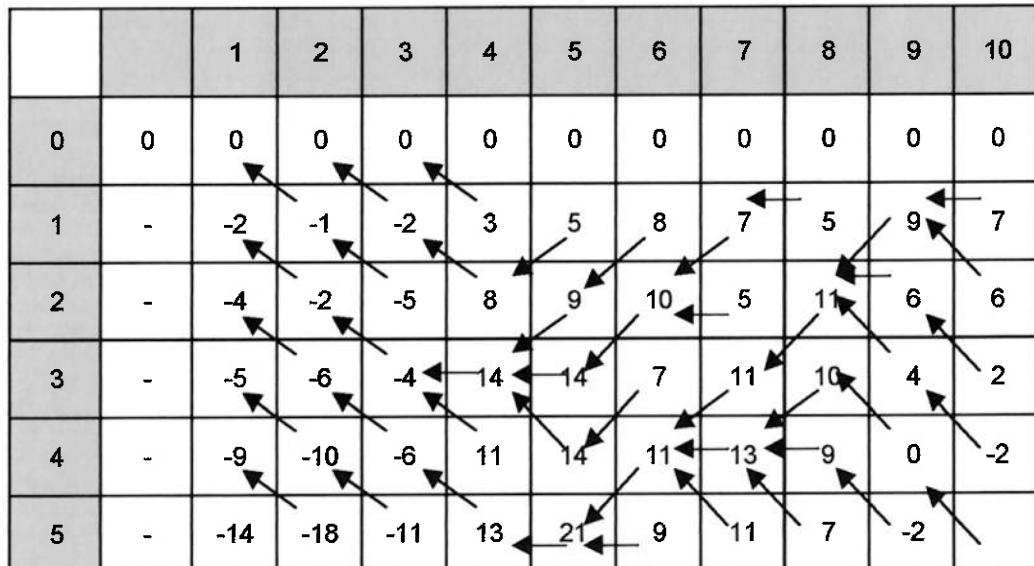


Figura 10.9 – Análise final

O limite da cava na seção será definido acompanhando o fluxo das setas a partir do bloco (0,10). A figura 10.10 apresenta este fluxo.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-	-2	-1	-2	3	5	8	7	5	9		7
2	-	-4	-2	-5	8	9	10	5	11	6	6	
3	-	-5	-6	-4	14	14	7	11	10	4	2	
4	-	-9	-10	-6	11	14	11	13	9	0	-2	
5	-	-14	-18	-11	13	21	9	11	7	-2		

Figura 10.10 - Configuração da cava final – Lerchs-Grossmann

Estes limites são os mesmos definidos no Anexo 01.

ANEXO 3 - GEOLOGIA

11.1 – Geologia Regional

A Província Mineral de Carajás está limitada a norte pela serra do Bacajá, ao sul pela serra dos Gradaús, a leste pelos rios Araguaia e Tocantins e a oeste pelo rio Xingú, situando-se, aproximadamente, entre as latitudes $05^{\circ}24'42''$ S e $08^{\circ}00'00''$ S e as longitudes $51^{\circ}00'00''$ W e $49^{\circ}21'42''$ W.

A sintetização do conhecimento regional acumulado nas décadas de 60 e 70 na Província Mineral de Carajás levou Hirata *et al.* (1982) a propor uma coluna estratigráfica informal, conforme apresentado na figura 11.1.a

Objetivando facilitar o entendimento da evolução geológica da região e uniformizar a nomenclatura para as unidades definidas, foi proposta uma coluna litoestratigráfica pela equipe do Distrito Amazônia da DOCEGEO, elaborada a partir dos dados acumulados pela empresa desde 1974, somados aos resultados de trabalhos desenvolvidos por outras empresas e instituições de pesquisas - In: DOCEGEO (1988). Nesta proposta, os *greenstone-belts*, que até então faziam parte do Complexo Xingu, foram agrupados no Supergrupo Andorinhas, o qual encontra-se intrudido por granitóides arqueanos e complexos máficos-ultramáficos diferenciados. A coluna é composta pelo Supergrupo Andorinhas (Grupos Babaçú e Lagoa Seca), Complexo Pium, Complexos Intrusivos Luanga e Serra Azul, Granitóides Arqueanos (Granodiorito Rio Maria, Trondjemito Mogno e Tonalito Parazônica), Complexo Xingu, Supergrupo Itacaiúnas (Grupos Igarapé Salobo, Grão-Pará, Igarapé Bahia e Buritirama), Grupo Rio Fresco, Grupo Tocantins, Suíte Máfica-Ultramáfica Quatipuru, Gabbro Santa Inês, Corpos Graníticos Pós-Tectônicos e diques básicos e ácidos, ver figuras 11.1.b e 11.1.c.

PERÍODO	UNIDADES		LITOLOGIAS
PROTEROZOICO	SUPER GRUPO BAIXO ARAGUAIA		FILITOS, QUARTZITOS, GRAUVACAS, ROCHAS CARBONATADAS, BIOTITA-XISTOS, GNAISSES, INTRUSIVAS, MÁFICO-ULTRAMÁFICAS
	FORMAÇÃO GOROTIRE		ARENITOS FELDSPÁTICOS E, LOCALMENTE, CONGLOMERADOS
	GRUPO UATUMÃ	GRANITO VELHO GUILHERME	RIOLITOS, RIODACITOS, ANDESITOS, ROCHAS PIROCLÁSTICAS, CORPOS INTRUSIVOS GRANÍTICOS A GRANODIORÍTICOS PORTADORES DE Sn.
INFERIOR	FORMAÇÃO RIO FRESCO	GRANITO SERRA DOS CARAJÁS	CONGLOMERADOS, ARENITOS, SILITOS, FOLHELHOS, CHERT, NÍVEIS CARBONATADOS, ÀS VEZES MANGANESÍFEROS (AZUL), OCORRÊNCIAS DE Au, Cu (SERRA PELADA, BAHIA) VULCÂNICAS BÁSICAS, FORMAÇÃO FERRÍFERA (ÁREA BAHIA). CORPOS INTRUSIVOS DE COMPOSIÇÃO GRANÍTICA A GRANODIORÍTICA.
	GRUPO GRÃO-PARÁ		META VULCÂNICAS MÁFICAS E JASPILITOS
	SEQUÊNCIAS TIPO SALOBO-POJUCA		GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS, FORMAÇÕES FERRÍFERAS (3A) BANDADAS, ROCHAS A ANTOFILITA-CORDIERITA (MMI) BIOTITA-XISTOS, QUARTZITOS, MÁMORES MANGANESÍFEROS (BURITRAMA).
ARQUEANO	COMPLEXO XINGÚ		GNAISSES, ENCLAVES DE ANFIBOLITOS, GRANITOS, MIGMATITOS E GRANULITOS. <i>GREENSTONE BELTS / GRANITÓIDES (gB)</i> SEQUÊNCIAS VULCANO-SEDIMENTARES DA FÁCIES XISTO VERDE (ROCHAS VULCÂNICAS ULTRAMÁFICAS A FÉLICAS, FORMAÇÕES FERRÍFERAS, SILITOS, GRAUVACAS) E ROCHAS INTRUSIVAS (GRANITOS, GRANODIORITOS). COMPLEXO BÁSICO-ULTRABÁSICOS ESTRATIFICADOS (PIUM).

Figura 11.1.a – Coluna Estratigráfica Informal da Província Mineral de Carajás
(Hirata et al. 1982).

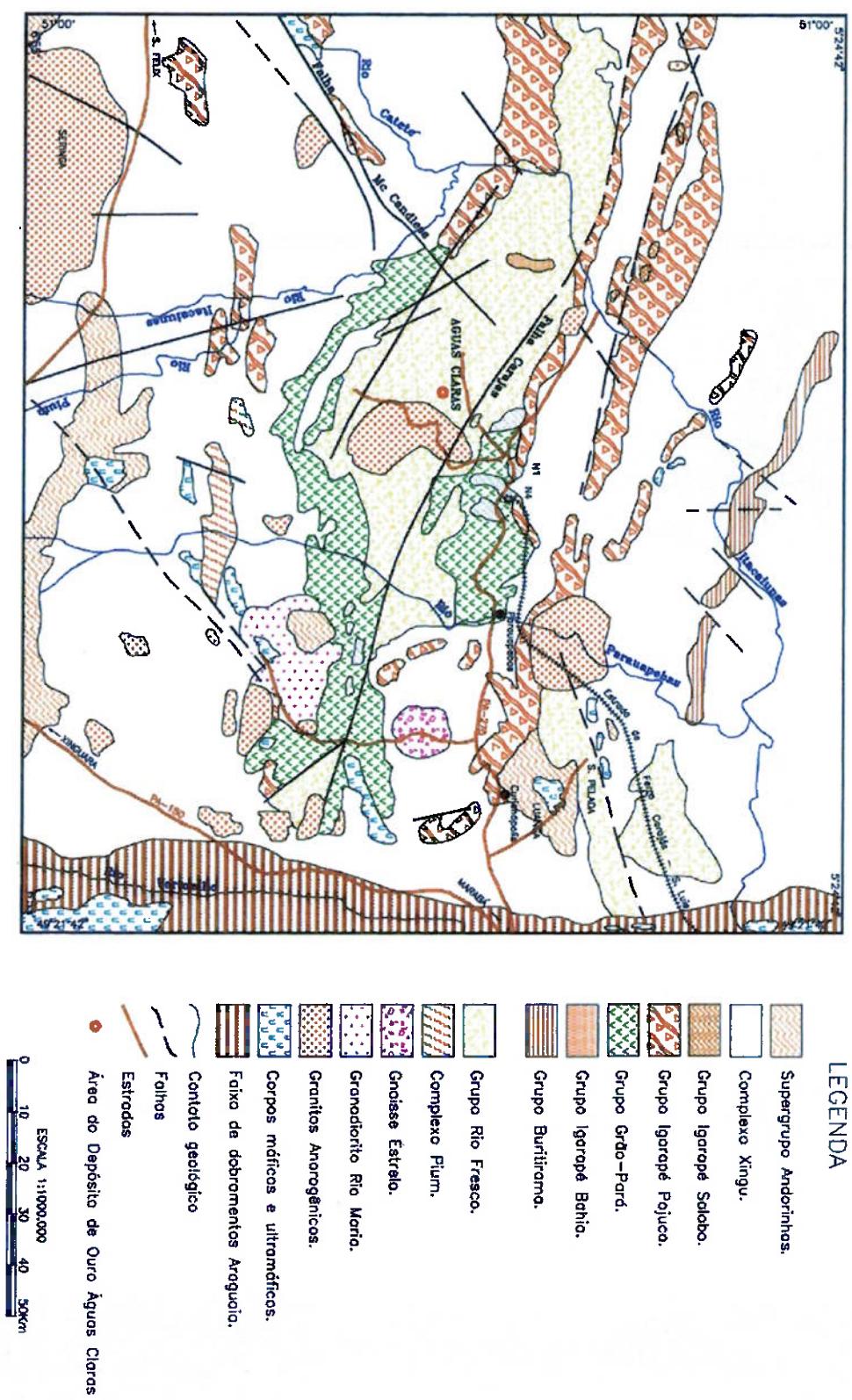


Figura 11.1.b – Mapa Geológico Parcial da Província Mineral de Carajás (modificado de DOCEGEO 1988)

EON ERA (b.a)	SUPER GRUPO	GRUPO	FORMAÇÃO	COMPLEXO	SUITE	GRANITÓIDES/GRANITO	VARIACÃO NA COLUNA
			OUQUES BÍSICOS / ÁRIDOS *				
1.10						SERRIGA, JAMON	
1.80						CARAJÁS, CICANO, MUSA GRADIMAS, BORVACHADO, XINGUARA*, SÃO JOSE, SÃO JOSÉ, CACHOEIRINHA, BANHACH*, MARAJORA, etc.	
						QUATIPURU*	
-1.90							
TOCANTINS/RIO FRESCO			RIO NAJÁ				
			KARAPÉ AZUL			ESTRELA (?)	
-2.25							
BURITIRAMA			SLAMDOURO			TOMALITO PARACAIMA	
KG. BAHIA			GROTA DO VENHO			TRONCHAMENTO MOSSO	
-2.40						GRANDEMORTO RIO MARA	
			PALEOMALCANCIA SUPERIOR				
-2.60							
CRÔO PARK			CARAJÁS				
			PARAUAPEBAS				
-2.75							
ITACAJUNAS							
IGARAPÉ SUCUO			CINZENTO				
			TRES ALFA				
-2.85			GUASSE CASCATA				
ANDORINHAS/ SERRA DO INAJÁ			LJANGA/ SERRA AZUL *				
-2.90			XANGU				
LUCIA SECA / RIO PRETO							
			RECANTO AZUL				
			FRENTE DA QURCAS				
			MAMUJO				
>2.85							
BABACU / SANTA LUTIA			KARAPÉ ENCANTADO				
			PIUM*				

* Sem dados geocronológicos:

Figura 11.1.c – Coluna Lito-Estratigráfica / Província Mineral de Carajás (Fonte: DOCEGEO 1988).

Araújo & Maia (1991) caracterizaram as unidades geotectônicas mais antigas (unidades litoestruturais do Proterozóico Médio) e as unidades do Fanerozóico na Folha Serra dos Carajás; descreveram e identificaram os terrenos granito-greenstones, propondo a denominação formal de grupo Tucumã para tais terrenos, os quais DOCEGEO (1988) agrupara como Supergrupo Andorinhas sem sugerir grau hierárquico para vários conjuntos conhecidos. A coluna estratigráfica apresentada por Araújo & Maia (1991) compõe-se das seguintes unidades:

- **Complexo Xingu** (correspondendo à designação já consagrada, porém resguardando-a ao domínio do que agora se denomina Cinturão Itacaiúnas);
- **Complexo Pium** (complexo básico-ultrabásico com aleitamento tectônico e não estratigráfico, como proposto por DOCEGEO (1988));
- **Gnaisse Estrela** (conjunto de variedades composicional, metamórfica e deformacional distintas do que DOCEGEO (1988) definira como maciço granítico);
- **Grupo Sapucaia** (produto de retrabalhamento dos greenstone-belts apresentados por DOCEGEO (1988));
- **Grupo Tucumã** (greenstone-belts preservados do retrabalhamento cisalhante do Cinturão Itacaiúnas);
- **Granodiorito Rio Maria;**
- **Grupo Rio Novo** (parte de uma seqüência vulcano-sedimentar gerada a partir de um sistema transcorrente, anteriormente designada de Seqüência Andorinhas por DOCEGEO (1988));
- **Grupo Grão-Pará** (mantendo-se as designações: Formação Parauapebas para a seqüência metavulcânica do grupo e Formação Carajás para as formações ferríferas, propondo-se a designação de Formação Águas Claras para a porção metassedimentar, bastante preservada e isenta de deformação apenas na porção mais interna da bacia, em substituição à Formação Rio Fresco);
- **Suite Plaquê** (granitóides lenticulares e deformados);
- **Grupo Tocantins;**
- **Ultramáfica tipo Vermelho;**
- **Máficas tipo Santa Inês;**

- **Suíte Granítica Anorogênica** (granitos Seringa, Carajás, Cigano e plutonismo básico de idade mesozóica - Diabásio Cururu).

O mapa geológico da folha Serra dos Carajás, bem como sua coluna estratigráfica podem ser visualizados nas figuras 11.1.d e 11.1.e, respectivamente.

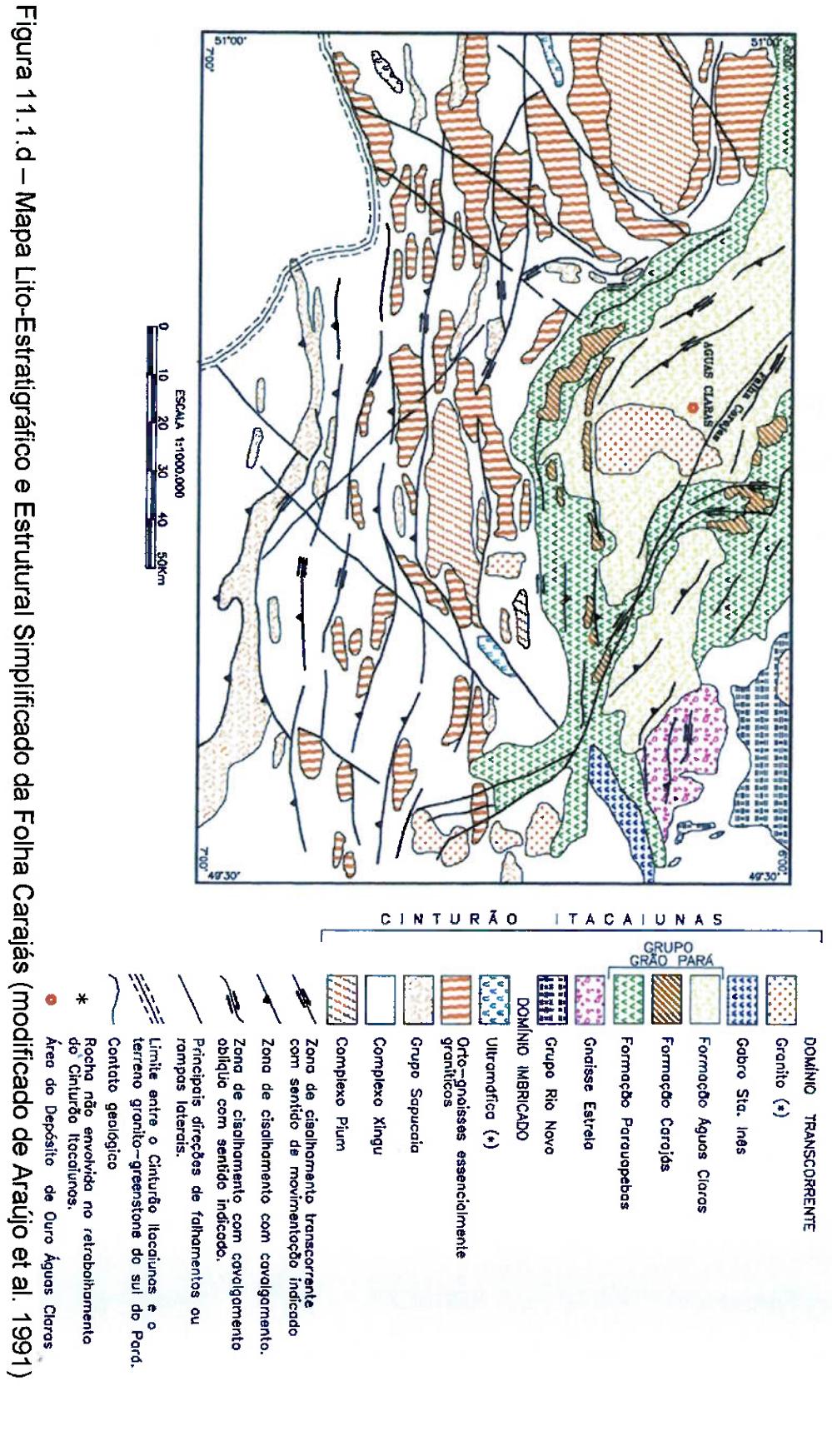


Figura 11.1.d – Mapa Lito-Estratigráfico e Estrutural Simplificado da Folha Carajás (modificado de Araújo et al. 1991)

UNIDADE		LITO TIPOS / METAMORFISMO / DEFORMAÇÃO / METALOGENIA
	COBERTURA COLÚVIO / ELÚVIO / ALUVIONAR	Cascalhos, areias, siltos em argilas em proporções variadas, de impossível cartografia na escala deste trabalho, mas de grande importância metalogenética devido às inúmeras ocorrências de ouro em seus domínios.
	COBERTURA LATERÍTICA	Lateritos aluminosos e ferruginosos, com perfis mais ou menos desenvolvidos, exibindo horizontes argilosos, friáveis e concrecionários.
	DIQUE BÁSICOS	Diabásios a hiperstênio e/ou auralita de jazimento hipoabissal. Não apresentam metamorfismo, são isentos de deformação e não há registro de ocorrências minerais a eles associadas.
	SUÍTE GRANÍTICA ANOROGÊNICA	Alcalifeldspato-granitos e granitos pôrfiros do tipo A, intraplaca, mostrando homogeneidade textural, mineralógica e faciológica. Exibem granulação média a grossa, tons rosa-cinza a rosa avermelhado e características rapakivíticas. Processos de albitionização e associações geoquímicas indicam favorabilidade para Sn, F, Mo, Cu (Pb-Y)
	MÁFICAS TIPO SANTA INÊS	Rochas básicas de natureza gabróide, metamorfizadas na fácie xisto-verde, exibindo incipiente anisotropia estrutural. Não há registro de ocorrências minerais, nem mesmo de associações geoquímicas significativas em seus domínios.
	ULTRAMÁFICA TIPO VERMELHO	Serpentinitos e piroxenitos metamorfizados na fácie xisto-verde, afetados por incipiente processo deformacional de natureza dúctil-rúptil, contendo mineralização de Ni e associações geoquímicas de Cr-Cu-Co e Sc.
	GRUPO TOCANTINS	Filitos e ardósias epimetamorfizados, sem registro de ocorrências minerais na folha trabalhada.
	SUÍTE PLAQUÊ	Granitóides leucocráticos, potássicos, a duas micas, estratoides, sincolisionais, metamorfizados em fácie anfibolito baixo-médio, com diferentes intensidades na taxa deformacional. Há registro de garimpo abandonado de cassiterita e localizadas associações geoquímicas de Sc-La.
Grupo Grão- Pará	FORMAÇÃO ÁGUAS CLARAS	Metarenitos conglomeráticos de ambiente fluvial tipo "braided", siltitos e argilitos ritmicos lacustres, associados a camadas manganesíferas.
	FORMAÇÃO CARAJÁS	Formações ferríferas bandadas e corpos de minério de ferro associados.
	FORMAÇÃO PARAUAPEBAS	Metabasaltos, metadacitos e metariolitos com variada alteração hidrotermal, faciologia metamórfica e intensidade deformacional. Apresentam evidências de íntimo relacionamento espacial e genético com a formação ferrífera da unidade Carajás e suportam os jazimentos bauxíticos como coberturas terciárias.
	GRUPO RIO NOVO	Anfibolitos, xistos a tremolita, clorita e acinolita, formações ferríferas bandadas e xistos micáceos, paraderivados, exibindo variada faciologia metamórfica e marcante anisotropia estrutural. Nos seus domínios chama a atenção a presença de vários garimpões de ouro associados a zonas de cisalhamento dúctil, além de grande variedade de associações geoquímicas de Cu-Pb-Zn-Ni-B-La e Nb.
	GRANODIORITO RIO MARIA	Granodioritos e tonalitos em fáceis anfibolito baixo a médio exibindo estágio deformacional protomilonítico a milonítico. As zonas mais deformadas, em contato com o Grupo Tucumã, oferecem interesse prospectivo para ouro.
	GRUPO TUCUMÃ	Xistos actinolíticos, tremolíticos e cloríticos, xistos sericíticos, filitos quartzosos e quartzitos micáceos em associação metamórfica de fáceis xisto-verde e intensidade deformacional variada. Muitos garimpões de ouro justificam a grande importância metalogenética da seqüência.
	GRUPO SAPUCAIA	Metaultramáfitos a acitinolita, tremolita, clorita e talco; metarnafitos e acinolita, plagioclásio, Quartzo e clorita-xistos micáceos. Apresentam intensidade metamórfica compatível com a fáceis xisto-verde, variados padrões e taxas de deformação e significativas concentrações de garimpões de ouro, além de associações geoquímicas de Nb-Y-B e V foram registradas.
	GNAISSE ESTRELA	Gnaisses graníticos, tonalíticos e granodioríticos, localmente migmatizados ou exibindo texturas granoblastíticas. Apresentam faciologia metamórfica de grau anfibolito alto, com padrões deformacionais de protomilonito a milonito. Há registros de muitos garimpões de ouro alinhados com zonas de cisalhamento. Algumas associações geoquímicas de Nb-Y-B e V foram registradas.
		Piriclesitos, enderbitos, charnoquitos e granoblasitos com frequente e

COMPLEXO PIUM	marcante retrometamorfismo a fáceis anfibolito em regime deformacional de caráter cisalhante heterogêneo. Ocorrências de Cu e Au são registradas no domínio da unidade, bem como variadas associações geoquímicas de S-V-Zr e Cr-Ni e Co.
COMPLEXO XINGU	Gnaisses tonalíticos a granodioríticos mais ou menos migmatizados com enclaves anfibolíticos. Exibem fáceis metamórfica de grau anfibolito e variada anisotropia estrutural. Metalogeneticamente apresentam ocorrências de ouro orientadas aos "trends" das zonas de cisalhamento, além de variadas e complexas associações geoquímicas, dependendo da maior ou menor lenticularização interna de conjunto.

Figura 11.1.e – Coluna Lito-Estratigráfica da Folha Serra dos Carajás (Araújo & Lima 1991).

11.2 – Unidades Litológicas

Na porção oriental do Craton Amazônico foram identificadas seqüências vulcanosedimentares, caracteristicamente do tipo *greenstone-belt*, com granitóides associados, representando os pacotes mais antigos desse segmento crustal, ocorrendo mais ao sul da Serra dos Carajás, na região de Rio Maria e, ainda mais para o sul, na Serra do Inajá. O conjunto das litologias que integram esses *greenstone-belts* foi denominado de Supergrupo Andorinhas por DOCEGEO (1988), sendo composto por dois grupos: Babaçu e Lagoa Seca.

Intrusivos neste supergrupo ocorrem granitóides arqueanos, como: Granodiorito Rio Maria - MEDEIROS (1987), Trondjemito Mogno e Tonalito Parazônica, os quais apresentam composições granodiorítica, trodhjemítica e tonalítica, constituindo batólitos de configuração dômica, arrasada, compondo grande parte dos terrenos *granito-greenstone* da região.

Na área da Folha Serra dos Carajás, ARAÚJO & MAIA (1991) propõem as denominações formais de: Grupo Tucumã para as rochas supracrustais tipo *greenstone-belt* preservadas do retrabalhamento cisalhante do Cinturão Itacaiúnas; Grupo Sapucaia para os conjuntos metavulcânicos e metassedimentares caracterizados como *greenstone-belt* submetido a regime de cisalhamento dúctil no final do Arqueano; e Grupo Rio Novo para os anfibólio-clorita xistos associados a zonas subordinadas de rochas félscicas, formações ferríferas bandadas e *metachert* constituintes de uma seqüência tipo *greenstone-belt*, englobando parte do anteriormente denominado Grupo Igarapé Pojuca por DOCEGEO (1988). Estas três últimas unidades haviam sido englobadas no Supergrupo Andorinhas por DOCEGEO (1988).

Foram constatados, na Província Mineral de Carajás, *sills* máfico-ultramáficos diferenciados, geralmente intrudidos em *greenstone-belt*, a exemplo do Complexo Intrusivo Luanga e Complexo Intrusivo Serra Azul.

Na porção nordeste da Folha Serra dos Carajás ocorre um corpo denominado de Granito Estrela por DOCEGEO (1988) e de Gnaisse Estrela por ARAÚJO & MAIA (1991), os quais, em estudo detalhado da unidade, observam que o corpo Estrela

possui variações morfológicas, deformacionais e, acima de tudo, uma assinatura geofísica marcante que permite não apenas a revisão na sua cartografia, como na conceituação de sua denominação. Segundo BARROS & DALL'AGNOL (1993), o corpo Estrela corresponde a um ortognaisse com caráter metaluminoso a fracamente peralcalino, com afinidade alcalina e fortes similaridades com granitos tipo A. O Gnaissse Estrela documenta um magmatismo arqueano tipo A na região de Carajás.

DOCEGEO (1987) refere-se a rochas granulíticas que ocorrem na área Pium, constituindo o denominado Complexo Pium. Para ARAÚJO *et al.* (1988) estas rochas seriam porções da crosta inferior soerguidas através de zonas de cisalhamento, e ARAÚJO & MAIA (1991) observam que as mesmas representam aleitamentos tectônicos, muitas vezes erroneamente interpretados como aleitamentos estratiformes ou mesmo como relações aparentes de intrusão, como sugerido por DOCEGEO (1987).

Representando o pano de fundo para todas as seqüências vulcano-sedimentares e corpos litológicos isolados que ocorrem na porção leste do Craton Amazônico, foi definido por SILVA *et al.* (1974) o Complexo Xingu como um conjunto de rochas arqueanas, polimetamórficas (gnaisses, migmatitos, granitos, cataclasitos), orientadas segundo a direção geral WNW-ESE. Para DOCEGEO (1988), este complexo fica restrito às rochas gnáissicas, às vezes migmatizadas, de composição tonalítica, trondjemítica e/ou granodiorítica, tidas como resultado do retrabalhamento metamórfico sobre terrenos arqueanos, tendo sido separado dos *greenstone-belts*. O posicionamento estratigráfico do Complexo Xingu é dos mais controversos ainda hoje.

Na área da Serra dos Carajás foram identificadas varias seqüências vulcano-sedimentares, ainda não tendo sido encontradas feições que as classifiquem, inequivocamente, como do tipo *greenstone-belt*. Estas unidades foram atribuídas ao Arqueano Superior e reunidas no denominado Supergrupo Italianas (DOCEGEO, 1988), o qual constitui-se dos grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão-Pará, Igarapé Bahia e Buritirama. Não se descarta a possibilidade de haver correlação estratigráfica entre estas unidades.

Rochas de alto grau metamórfico na fácie anfibolito constituem, na área Salobo 3A, um pacote de xistos ricos em ferro, portador de mineralizações de Cu, (Au e Mo associados) do tipo estratiforme, encontrando-se este pacote encaixado em quartzitos e gnaisses, compondo a unidade denominada de Grupo Igarapé Salobo por DOCEGEO (1988), a qual considera os depósitos e ocorrências de Cu (Au, Mo, Ag) aí contidos, como formados em ambiente exalativo-sedimentar. Encontra-se em contato com o Complexo Xingu e o Grupo Igarapé Pojuca.

Um pacote vulcano-sedimentar de grau metamórfico variando da fácie xisto verde a anfibolito, grosseiramente paralelo ao Grupo Igarapé Salobo, com mergulhos variando de 50°NE a 60°SW, foi denominado por DOCEGEO (1988) de Grupo Igarapé Pojuca, o qual compõe-se de rochas vulcânicas básicas a intermediárias (freqüentemente alteradas para assembléias a cordierita-antofilita), anfibolitos, rochas gnáissicas, sedimentos químicos (*chert*, BIF na fácie óxido-silicatada) e

xistas de composições variadas, ocorrendo ainda, corpos graníticos intrusivos nesta seqüência, que são correlacionados ao Granito Carajás. Hospeda diversos depósitos de Cu e Cu(Zn), com Au e Mo associados, principalmente na fácie sulfetada da formação ferrífera.

O Grupo Grão-Pará foi inicialmente subdividido em três unidades: Paleovulcânica Inferior, Formação Carajás, e Paleovulcânica Superior. Porém, REZENDE & BARBOSA (1972) alegam, com base em dados microscópicos, serem semelhantes entre si as unidades Paleovulcânicas Inferior e Superior. HIRATA *et al.* (1982) admitem o Grupo Grão-Pará como de idade arqueana e não proterozóico inferior, como aceito até então. MEIRELES *et al.* (1984) constataram a existência de níveis de rochas vulcânicas félscicas e porfiríticas na porção intermediaria da seqüência Paleovulcânica Inferior do Grupo Grão-Pará, constituindo-se em uma seqüência bimodal, a qual denominaram de Formação Parauapebas. Os metabasaltos do Grupo Grão-Pará encontram-se hidrotermalmente alterados e constitui-se em produto de um evento vulcânico marinho de composição tholeiítica (LEMOS & VILLAS, 1983 e MEIRELES *et al.*, 1984). FERREIRA FILHO (1985) sugere uma provável correlação entre os metabasaltos da área do Igarapé Bahia e os do Grupo Grão-Pará. LINDENMAYER (1990) coloca o depósito do Igarapé Bahia como hospedado pela Seqüência Vulcânica Superior do Grupo Grão-Pará. Para ARAÚJO & MAIA (1991), uma vez que unidades como a Seqüência Salobo-Pojuca, Formações Carajás e Rio Fresco, apresentam o mesmo padrão deformacional, elas passam a ser entendidas como integrantes do Grupo Grão-Pará, e propõem o termo Águas Claras para designar a porção metassedimentar, bastante preservada e isenta de deformação apenas na porção mais interna da bacia; mantêm as denominações Formação Parauapebas (para a seqüência metavulcânica) e Formação Carajás (para as formações ferríferas).

Há ainda uma dificuldade muito grande para se estabelecer se as rochas vulcânicas básicas do Grupo Grão-Pará representam basaltos originados em um *rift* continental (GIBBS *et al.* 1986; DOCEGEO 1988; OLSZEWSKI *et al.* 1989), ou shoshonitos associados a processos de rifteamento relacionado a margens destrutivas de placas em subducção (DARDENNE *et al.* 1988; MEIRELLES & DARDENNE, 1991). O caráter cálcio-alcalino identificado nestas rochas corrobora esta última interpretação, porém a natureza bimodal das vulcânicas do Grupo Grão-Pará e seus valores de \square^{Nd} (4,6 a 7,0), como também a larga variação das razões isotópicas iniciais de Sr (0,701 a 0,715; GIBBS *et al.* 1986) apontam fortemente para a contaminação dos basaltos derivados do manto por material da crosta continental, em ambiente de *rift* continental. Se esta interpretação é correta, então o grupo Grão-Pará e as outras seqüências a ele possivelmente correlacionadas, por exemplo, o Igarapé Bahia, estão entre as mais antigas seqüências reconhecidas de basaltos continentais intraplacas do planeta (OLIVEIRA *et al.*, (1993)).

Inicialmente correlacionado com a Formação Rio Fresco (BERNADELLI & BEISIEGEL, 1978; HIRATA *et al.*, 1982; FONSECA *et al.*, 1984), o Grupo Igarapé Bahia teve suas ocorrências de Cu associadas as grauvacas e pelitos carbonosos (HIRATA *et al.*, 1982). A hipótese de contemporaneidade entre a seqüência Bahia e as rochas metavulcânicas do grupo Grão-Pará (dada pela semelhança litológica,

geoquímica e geocronológica, associada a deformação) levou FEIRA FILHO (1985) a descartar a correlação da área Bahia com a Formação Rio Fresco, como admitido até então. Constitui-se em um pacote vulcão-sedimentar de baixo grau metamórfico, com direção NNW e mergulhos de aproximadamente 70° para leste, composto por rochas metavulcânicas básicas, metapiroclásticas, metassedimentos psamo-pelíticos e formações ferríferas. Apresenta mineralizações a Cu e Cu-Au-Mo-Ag, e a zona de intemperismo que contém a mineralização aurífera (DOCEGEO, 1988).

O pacote de sedimentos clásticos e químicos, com alinhamento geral N55'W apresentando, da base para o topo, quartzitos micáceos, mica-xistos, quartzitos bandados e xistos variados, presente na Serra de Buritirama, foi denominado por DOCEGEO (1988) de Grupo Buritirama. Mica-xistos carbonatados, rochas cálcio-silicáticas e leitos de mármore são o protominério do manganês. ANDRADE *et al.* (1986) correlacionaram o Grupo Buritirama ao Grupo Grão-Pará. As características litológicas dos Grupos Grão-Pará e Buritirama são acentuadamente diferentes e, por esse motivo, foram tratados como unidades distintas por DOCEGEO (1988).

No Proterozóico Inferior foi depositado um pacote eminentemente siliciclástico, composto por arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados, submetidos a condições anquimetamórficas, que transgride todas as seqüências arqueanas, havendo predominância para correlacioná-lo ao Grupo Rio Fresco (DOCEGEO, 1988), ou Formação Rio Fresco (SILVA *et al.*, 1974; HIRATA *et al.*, 1982). Alguns autores, como RAMOS *et al.* (1984), FIGUEIRAS & VILLAS (1984), ARAÚJO & MAIA (1991), contestam esta correlação. Esta seqüência teria sido depositada em condições plataformais.

Cortando todas as entidades anteriores, inclusive o Grupo Rio Fresco, ocorrem diversas intrusões de rochas graníticas, expressivamente representadas em mapas geológicos, que persistentemente apresentam idades em torno de 1.800 Ma, como exemplo o Granito Carajás (ou Central), apresentam caráter pós-tectônico e/ou anorogênico.

Intrudido nos sedimentos do Grupo Rio Fresco, e no Complexo Xingu, a SE do Granito Estrela, ocorre corpo gabróide tabular denominado Gabbro Santa Inês (DOCEGEO, 1988), e até o momento sem datação radiométrica. Observações petrográficas baseadas fundamentalmente na paragênese, no grau metamórfico, padrão estrutural, e na natureza protolítica gabbroide, sugerem uma possível litocorrelação com as supracrustais do Grupo Grão-Pará.

Granitóides lenticulares e deformados foram identificados e cartografados por ARAÚJO *et al.* (1988) na Folha Serra dos Carajás, aos quais denominaram de Suite Plaquê, preliminarmente interpretando-os como produto da fusão crustal, durante o evento de cisalhamento dúctil. ARAÚJO & MAIA (1991) propõem acrescentar o termo informal granito estratóide.

Outras unidades ocorrentes na Província Mineral de Carajás, porém fora da área da Serra dos Carajás, são: Grupo Tocantins, Grupo Uatumã, Formação Gorotire,

Granito Velho Guilherme, Formação Triunfo e Suite Máfica-Ultramáfica Quatipurú. In: SACHS (1993).

11.3 – Evolução do Conhecimento Tectônico Regional

Apesar dos vários trabalhos de cunho regional realizados na Província Mineral de Carajás até o inicio da década de 1980 (SILVA *et al.*, 1974, HIRATA *et al.*, 1982, entre outros), pouco se acrescentou ao entendimento da evolução estrutural da região e a interrelação entre os diferentes domínios estruturais que lá foram identificados.

A estruturação geral para a região de Carajás foi interpretada inicialmente pela CVRD/CMM (1972) como sinclínio falhado, cujas abas, constituídas pela formação ferrífera intercaladas em rochas vulcânicas maficas, aparecem em relevo, respectivamente, na Serra Norte e na Serra Sul.

HUTCHINSON (1979), interpretou as seqüências Buritirama, Salobo-Pojuca e o Grupo Grão-Pará, como representantes de diferentes fácies de uma única seqüência vulcano-sedimentar do Proterozóico Inferior.

WIRTH *et al.* (1986), estudando quimicamente os basaltos do Grupo Grão-Pará, concluíram que essas rochas mostram características tais que levaram estes autores admiti-las como tendo atravessado a crosta siálica pré-existente. Essa crosta siálica foi admitida como correlacionável ao Complexo Xingu de SILVA *et al.* (op. cit.).

TASSINARI *et al.* (1987) propuseram a existência de vários cinturões móveis Proterozóicos envolvendo núcleos cratônicos, baseados em datações radiométricas.

DOCEGEO (1988), com base em evidências isotópicas e químicas apresentada por GIBBS *et al.* (1986), propõe um ambiente de *rift* continental para o Grupo Grão-Pará.

DARDENNE *et al.* (1988) propõem, com base em análises químicas de elementos maiores e traços de basaltos do Grupo Grão-Pará, como tendo afinidades shoshoníticas, e levam a propor para a Serra dos Carajás um arco magmático vinculado a um complexo de subducção arqueana.

ARAÚJO *et al.* (1988) e ARAÚJO & MAIA (1991) definem na Província Mineral de Carajás o Cinturão Itacaiúnas como a principal estrutura geotectônica do Arqueano, nele distinguindo-se, ao norte, domínio transcorrente com seqüências vulcano-sedimentares associadas e, ao sul, domínio imbricado oblíquo caracterizado por forte lenticularização de rochas granulíticas, gnaisses diversos, granitóides e rochas supracrustais (Figura 1.1.e).

Segundo estes mesmos autores, em termos geométricos, o domínio transcorrente pode ser dividido em dois sistemas:

Sistema Serra dos Carajás: caracterizado por uma estrutura sigmoidal, alongada na direção WNW-ESE e limitada pelas serras Norte e Sul. As unidades rochosas do

Grupo Grão-Pará são os principais produtos litológicos relacionados a evolução dessa estrutura. Sua organização estrutural interna é interpretada por uma estrutura em "flor positiva", ligada a um binário sinistral E-W, com o componente transpressivo orientado na direção NE-SW;

Sistema Cinzento: localizado na porção NE da Província Mineral de Carajás envolve rochas constituídas principalmente por uma seqüência vulcana-sedimentar tipo *greenstone-belt* pertencente ao Grupo Rio Novo, além de rochas do Complexo Xingu e do Gnaisse Estrela, onde a geometria interna da mega estrutura é definida por frações lenticulares dos diferentes termos petrográficos supra citados. Essas rochas são envolvidas por uma estrutura tipo "rabo de cavalo", formada por zonas de cavalgamento oblíquo NE-SW, que divergem a partir da zona transcorrente principal WNW-ESE (COSTA & SIQUEIRA, 1990).

O domínio imbricado estende-se desde a borda sul da Serra dos Carajás até a região de passagem do terreno granito-*greenstone* imediatamente a norte do paralelo 7º sul.

Apresenta direção geral EW definindo em escala regional um mega bandamento composto por mega lentes de rochas supracrustais e de granitóides isolados à massa granítica, inclinação, em média de 60º para SSW.

A caracterização do sistema direcional da Serra dos Carajás descarta a estrutura sinclinorial proposta por BEISIEGEL *et al.*

LINDENMAYER & FYFE (1992) compararam o comportamento geoquímico das rochas da Formação Parauapebas (Grupo Grão-Pará), e do Grupo Salobo; entendem que ambos representam eventos contemporâneos e de características continentais presentes na bacia de Carajás, diferindo apenas no grau metamórfico mais elevado (fácies anfibolito) nas rochas do Grupo Salobo. Ambos seriam formados por basaltos toleíticos continentais enriquecidos em LILE a semelhança dos basaltos continentais Fanerozóicos das bacias do Paraná, Deccan e Karoo, tal como anteriormente admitido por GIBBS *et al.* (1986), para as metavulcânicas do Grupo Grão-Pará.

11.4 – Geocronologia

O início dos trabalhos geocronológicos na Província Mineral de Carajás remonta a vinte anos atrás, com dados obtidos por métodos Rb-Sr em rocha total e K-Ar em minerais e rocha total.

Datações feitas entre 1974 e 1984 levaram a proposições de modelos evolutivos onde a estruturação envolvendo formação, preenchimento e deformação de bacias da região de Carajás, teria se dado no Proterozóico Inferior.

Na última década, novo quadro evolutivo foi definido em função de metodologias de maior potencial, tais como U-Pb em rocha total e minerais, especialmente zircões; Rb-Sr e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em minerais e Pb-Pb por evaporação em zircões, comprovando-se

que a crosta da Província de Carajás é predominantemente Arqueana; sendo o Proterozóico marcado principalmente por granitos anorogênicos, diques e vulcânicas associadas.

As rochas mais antigas definidas até então na Província Mineral de Carajás são os metatonalitos gnáissicos Arco Verde da região de Rio Maria ($2957 +16-19$ Ma, U-Pb em zircões; MACAMBIRA & LANCELOT (1991); MACAMBIRA (1992) e os granulitos do Complexo Pium na área Cateté (3050 ± 114 Ma, Pb-Pb em rocha total; RODRIGUES *et al.*, 1992)).

Metavulcânicas do Grupo Lagoa Seca apresentam idade $2904 +29-22$ Ma (U-Pb em zircões; MACAMBIRA & LANCELOT, 1992), e os granitóides que cortam os *greenstones-belts* da região de Rio Maria exibiram idades de $2876 +13-11$ Ma (U-Pb em zircões, MACAMBIRA & LANCELOT, 1991) e 2872 ± 10 Ma (Pb-Pb em RT, RODRIGUES *et al.* 1992).

O Complexo Xingu apresentou idades superiores a 2851 Ma, segundo MACHADO *et al.* (1991). Segundo estes autores, o Grupo Igarapé Salobo exibiu idades de 2851 Ma em zircões de anfibolitos e o Grupo Igarapé Pojuca, metamorfismo em torno de 2732 ± 3 Ma.

As rochas da Formação Parauapebas do Grupo Grão-Pará apresentaram idades de 2750 Ma (U-Pb segundo GIBBS *et al.*, 1986) e os metabasaltos 2687 ± 54 Ma (isócrona Rb-Sr em RT) e razões iniciais de $0,7057 \pm 0,0010$.

FERREIRA FILHO *et al.* (1987) obtiveram, através de isócrona Rb-Sr em RT, uma idade de 2577 ± 72 Ma para rochas básicas granofíricas do Grupo Bahia (DOCEGEO, 1988). As rochas piroclásticas silicosas dessa mesma área forneceram, através do mesmo método, uma idade de 2330 ± 60 Ma.

O Gnaisse Estrela apresentou a isócrona de 2527 ± 34 Ma (razão inicial de $0,70188 \pm 0,00197$ em RT), refletindo a idade do evento tectônico responsável pela gnaissificação de protólitos ígneos. BARROS & DALL'AGNOL (1993).

A evolução arqueana da região de Carajás seria marcada por eventos tectono-metamórficos significativos (ARAÚJO *et al.* 1988; OLSZEWSKI *et al.* 1989; MACHADO *et al.*, 1991). A formação da bacia de deposição do Grupo Grão-Pará (2757 ± 2 Ma) estaria associada ao primeiro deles (2,77-2,73 Ga). Essa bacia teria uma natureza cisalhante em ambiente de *rift* continental. O complexo máfico-ultramáfico de Luanga (2763 ± 6 Ma) seria contemporâneo a esse primeiro evento. O segundo evento tectono-metamórfico (2,58-2,50 Ga) provocaria a movimentação de blocos litosféricos, promovendo a deposição dos sedimentos do Grupo Rio Fresco. Esses eventos parecem ter atingido toda a Província de Carajás, como mostram as diversas datações de rochas arqueanas obtidas pelos métodos Rb-Sr em RT, $^{40}\text{K}/^{39}\text{Ar}$ em minerais. In- MACAMBIRA & LAFON (1994).

Grande número de granitos interpretados como anorogênicos se distribui em toda a Província mineral de Carajás durante o Proterozóico, a exemplo dos Granitos

Cigano, Musa e Carajás. A análise de zircões concordantes a sub-concordantes definiu a faixa de 1,88Ga para essa granitogênese (MACHADO *et al.*, 1991).

Dias *et al.* (1996) obtiveram, através de isócrona Pb-Pb, em zircões do Sill de metagabro, que corta os metassedimentos da Formação Águas Claras (ARAÚJO *et al.* 1988) ou Grupo Rio Fresco (DOCEGEO, 1988), na região do Alvo Águas Claras, uma idade mínima de 2645 ± 12 Ma. Esta datação coloca um ponto final na polêmica sobre a idade destes metassedimentos.

ANEXO 04 – Variogramas

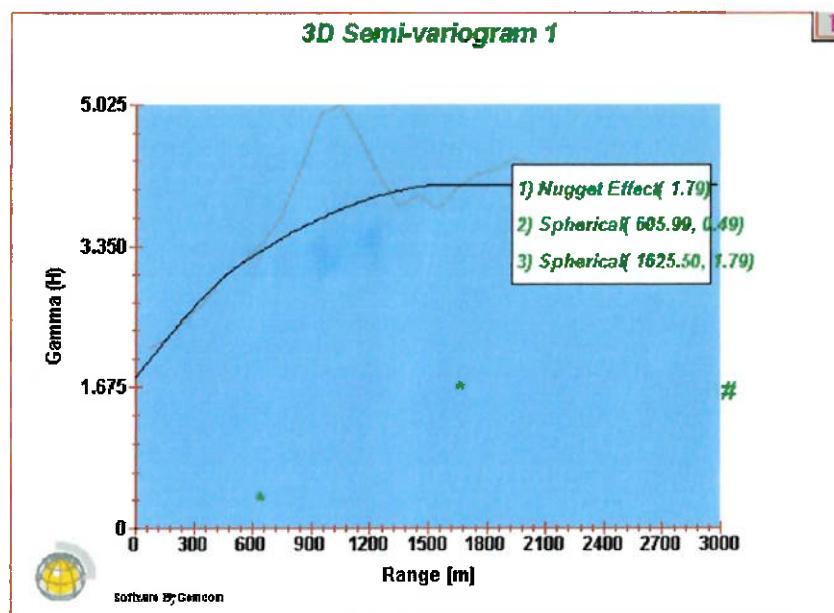


Fig. 12.1 - Variograma da Al₂O₃ – Ominidirecional

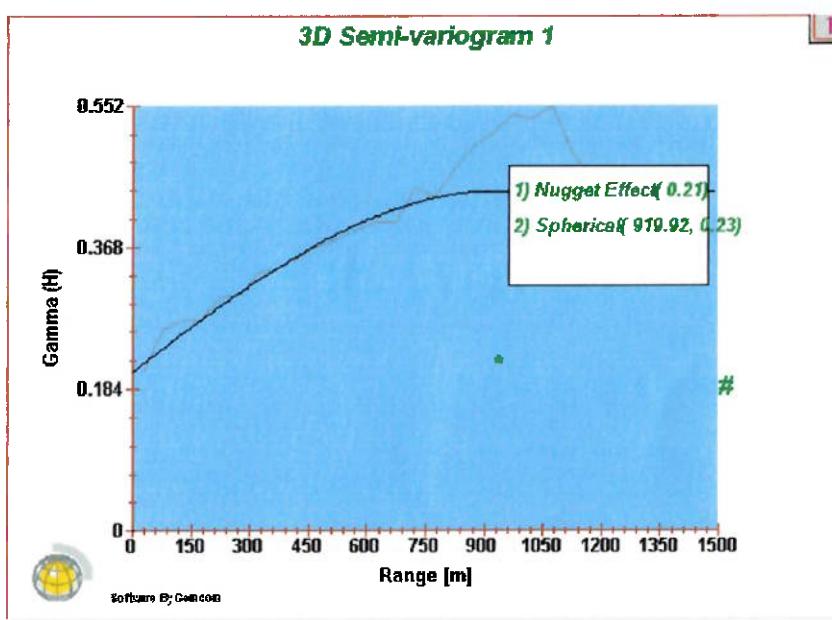


Fig. 12.2 - Variograma do Fe – Ominidirecional

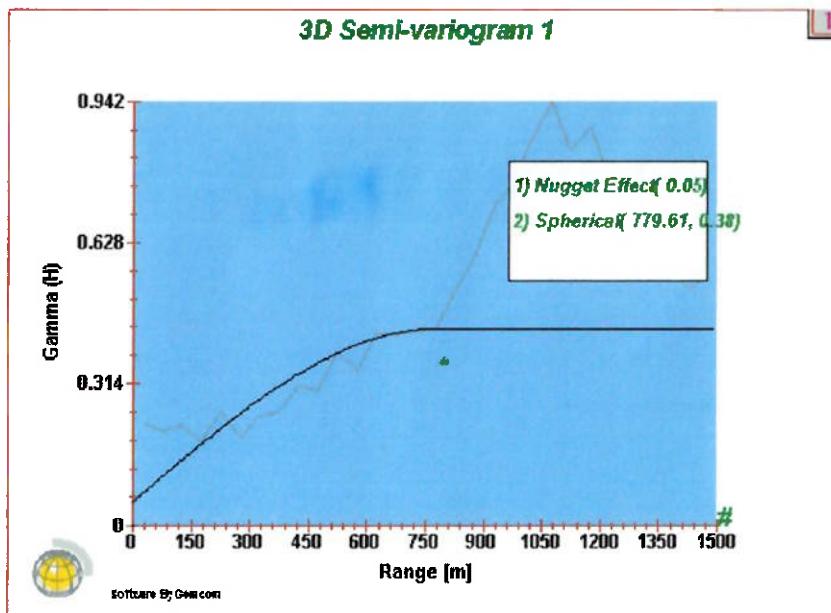


Fig. 12.3 - Variograma do Mn – Ominidirecional

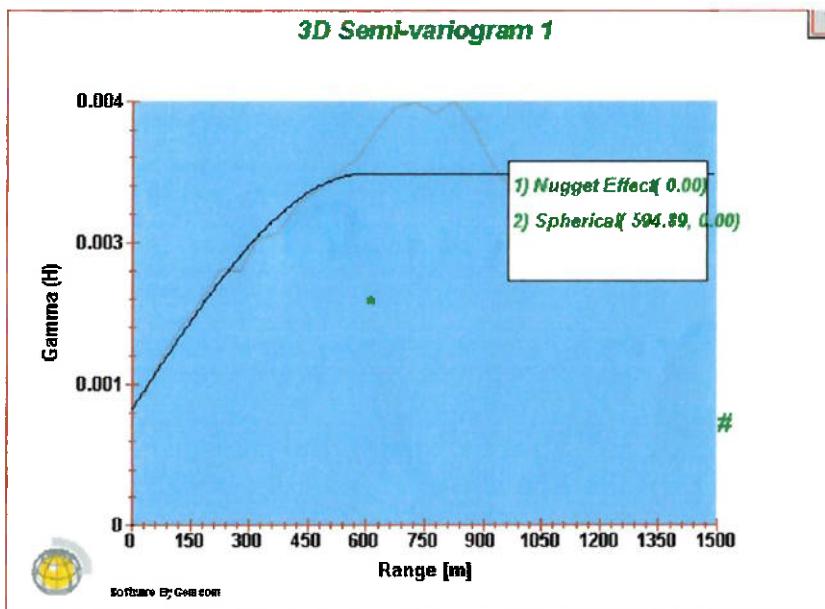


Fig. 12.4 - Variograma do P – Ominidirecional

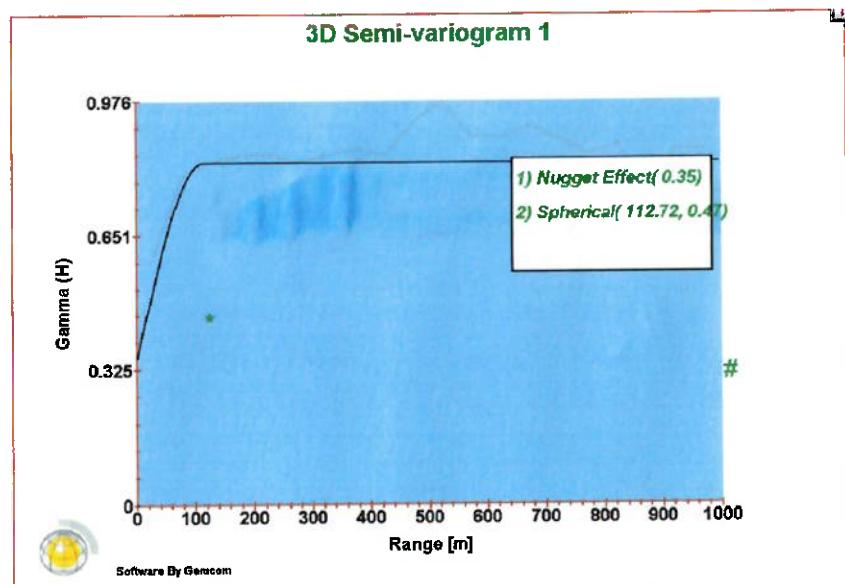


Fig. 12.5 - Variograma da SiO₂ – Ominidirecional

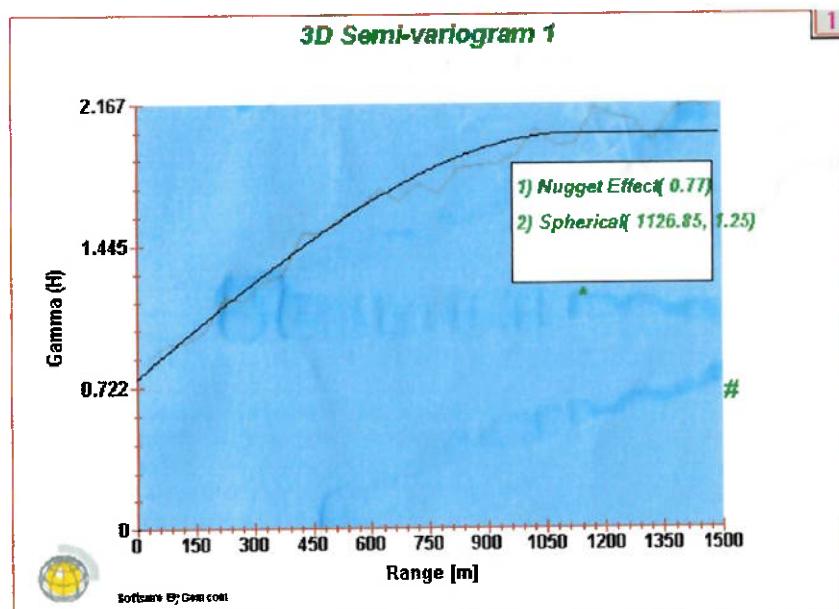


Fig. 12.6 - Variograma do PPC – Ominidirecional