



Resumo do Relatório Técnico

Complexo Serra Norte
Brasil

Relatório atual em:
31 de dezembro de 2021

Profissionais Qualificados	Assinatura	Data
Alessandro Resende, PQR CBRR		
Arnor B. Couto Jr., PQR CBRR		
Carlos E. R. Delgado, PQR CBRR		
Evandro M. Cunha Filho, MAusIMM		
Guilherme Paiva da Silva, PQR CBRR		
Helder Reis, PQR CBRR		
Hely Simões, PQR CBRR		
Teófilo Costa, PQR CBRR		

Índice

1. Sumário Executivo	13
1.1. Introdução.....	13
1.2. Descrição da propriedade	13
1.3. História	13
1.4. Geologia e mineralização	14
1.5. Exploração, sondagem e amostragem.....	15
1.6. Verificação de dados	17
1.7. Estimativa de recursos minerais	17
1.8. Estimativas de reserva mineral	19
1.9. Métodos de lavra	20
1.10. Métodos de processamento e recuperação.....	21
1.11. Infraestrutura.....	21
1.12. Estudos ambientais, permissões e planos, negociações ou acordos com indivíduos ou grupos locais	21
1.13. Estudos de mercado	22
1.14. Estimativas de custos de capital.....	22
1.15. Estimativas de custo operacional	23
1.16. Análise econômica	24
2. Introdução.....	26
2.1. Termo de referência e objetivo	26
2.2. A empresa	26
2.3. Visitas ao local.....	27
2.4. Profissionais Qualificados	28
2.5. Termos, unidades e abreviações	28
3. Descrição da propriedade	34
3.1. Código de mineração brasileiro	34
3.2. Direito Minerário	36
3.3. Direitos de superfície e Servidão	37
4. Acessibilidade, clima, recursos locais, infraestrutura e fisiografia	39
4.1. Acessibilidade.....	39
4.2. Clima	39
4.3. Recursos locais	39
4.4. Infraestrutura	39
4.5. Fisiografia	40
5. História	42
5.1. Exploração e história de desenvolvimento	42
5.2. Histórico de produção	43
6. Cenário geológico, mineralização e depósito.....	44

6.1.	Geologia regional.....	44
6.2.	Geologia local.....	53
6.3.	Geologia da propriedade	56
7.	Exploração.....	74
7.1.	Exploração.....	74
7.2.	Sondagem	75
7.3.	Hidrogeologia	82
7.4.	Geotecnia	84
8.	Preparação de amostras, análises e segurança	89
8.1.	Visão Geral.....	89
8.2.	Métodos de amostragem	89
8.3.	Métodos de segurança da amostra.....	90
8.4.	Determinações de Densidade.....	93
8.5.	Opinião da pessoa qualificada sobre preparação de amostras, segurança e procedimentos analíticos.....	95
9.	Verificação de dados	96
9.1.	Verificação de dados internos.....	96
9.2.	Verificação de dados externos.....	98
9.3.	Opinião da pessoa qualificada sobre a adequação dos dados.....	98
10.	Processamento mineral e testes metalúrgicos.....	99
10.1.	Resumo.....	99
10.2.	Laboratórios de teste.....	99
10.3.	Teste recente	99
10.4.	Desempenho Atual.....	100
10.5.	Elementos deletérios.....	100
10.6.	Opinião de pessoa qualificada sobre processamento mineral e testes metalúrgicos.	100
11.	Estimativa de recursos minerais.....	102
11.1.	Resumo.....	102
11.2.	Banco de dados de recursos.....	104
11.3.	Interpretação geológica.....	104
11.4.	Modelagem geológica	106
11.5.	Modelagem de domínio	120
11.6.	Análise de recursos.....	123
11.7.	Tratamento de ensaios de alto teor	125
11.8.	Composição	125
11.9.	Análise de Tendências	126
11.10.	Estratégia de pesquisa e análise de interpolação de teores	127
11.11.	Densidade Aparente.....	133
11.12.	Modelos de blocos	135
11.13.	Valor líquido de retorno e valor de corte.....	137

11.14.	Classificação	137
11.15.	Validação do modelo de blocos.....	141
11.16.	Reporte de recursos minerais	144
12.	Estimativas de reserva mineral.....	151
12.1.	Resumo.....	151
12.2.	Metodologia.....	152
12.3.	Fatores que podem afetar a estimativa de reserva mineral	154
13.	Métodos de lavra.....	155
13.1.	Resumo.....	155
13.2.	Projeto de mina	155
13.3.	Método de lavra	160
13.4.	Considerações geotécnicas	160
13.5.	Considerações hidrogeológicas.....	172
13.11.	Plano de vida útil da mina	175
13.12.	Infraestrutura.....	176
14.	Métodos de processamento e recuperação.....	178
14.1.	Resumo.....	178
14.2.	Planta I.....	178
14.3.	Planta II.....	180
14.4.	Planta III.....	181
14.5.	ROM, produção, recuperação, qualidade e equipamento.....	182
14.6.	Logística.....	183
15.	Infraestrutura.....	184
15.1.	Acesso ao local	185
15.2.	Fonte de energia	185
15.3.	Abastecimento de água.....	185
15.4.	Edifícios do local	186
15.5.	Gerenciamento de estéril da mina e rejeitos.....	186
16.	Estudos de mercado	188
16.1.	Mercados	188
16.2.	Contratos	191
17.	Estudos ambientais, permissões e planos, negociações ou acordos com indivíduos ou grupos locais.....	193
17.1.	Aspectos ambientais	193
17.2.	Gerenciamento ambiental	197
17.3.	Requisitos sociais ou comunitários.....	198
17.4.	Fechamento da mina e uso futuro	199
18.	Custos operacionais e de capital.....	208
18.1.	Custos de capital.....	208
18.2.	Custos operacionais.....	208

19.	Análise econômica	210
19.1.	Cuidado com informações prospectivas	210
19.2.	Critérios econômicos	210
19.3.	Resultados da análise econômica	211
19.4.	Análise de sensibilidade	212
20.	Propriedades adjacentes	214
21.	Outros dados e informações relevantes	215
22.	Interpretação e conclusões	216
22.1.	Descrição da propriedade	216
22.1.	Exploração, perfuração e amostragem	216
22.2.	Verificação de dados	216
22.3.	Geologia e mineralização	216
22.4.	Declaração de recursos minerais	217
22.5.	Estimativa de reserva mineral	217
22.6.	Métodos de lavra	218
22.7.	Métodos de processamento e recuperação	218
22.8.	Estudos ambientais, permissões e planos, negociações ou acordos com indivíduos ou grupos locais	218
22.9.	Estimativa de custos de capital	218
22.10.	Estimativas de custo operacional	219
22.11.	Análise econômica	219
22.12.	Riscos e oportunidades	219
23.	Recomendações	222
23.1.	Descrição da propriedade	222
23.2.	Geologia e mineralização	222
23.3.	Hidrogeologia e Geotecnia	222
23.4.	Declaração de recursos minerais	222
23.5.	Reservas minerais e métodos de lavra	222
23.6.	Métodos de processamento e recuperação	223
23.7.	Estudos ambientais, permissões e planos, negociações ou acordos com indivíduos ou grupos locais	223
23.8.	Custos e economia	223
24.	Referências	224
25.	Confiança nas informações fornecidas pela companhia registrada	228
25.1.	Introdução	228
25.2.	Tendências Macroeconômicas	228
25.3.	Mercados	228
25.4.	Assuntos Legais	228
25.5.	Assuntos Ambientais	228
25.6.	Acomodação das Partes Interessadas	229
25.7.	Fatores Governamentais	229

Lista de Figuras

Figura 2-1 - Localização dos segmentos de negócios da VALE.....	27
Figura 3-1: Fluxograma do processo de licença	35
Figura 3-2 - Concessão de Mineração Serra Norte	37
Figura 3-3 - Servidões e propriedades na Serra Norte.	38
Figura 6-1 - Mapa tectônico da América do Sul (Cordani et al. 2016; Gómez et al. 2019), com localização das províncias de mineração brasileiras operadas pela Vale.	45
Figura 6-2 - Mapa Geológico da Província Mineral de Carajás (Costa et al., 2017).....	47
Figura 6-3 - Coluna Estratigráfica da Província Mineral de Carajás.	48
Figura 6-4 - Platôs de S11D (esquerda) e N1 (direita) da Província Mineral de Carajás.	50
Figura 6-5 - Seção transversal geológica da mina S11D, Província Mineral de Carajás	51
Figura 6-6 - Geologia do Complexo Serra Norte (direita) e imagens de satélite e aerogeofísicas (MAG)	53
Figura 6-7 - Mapa geológico N1	58
Figura 6-8 - Seção geológica N1	59
Figura 6-9 - Mapa geológico N2 e N3.	63
Figura 6-10 - Seção geológica em N3.....	64
Figura 6-11 - Mapa geológico N4	67
Figura 6-12 - Seção geológica N4W.	68
Figura 6-13 - Mapa geológico N5	71
Figura 6-14 - Seção geológica N5S.	72
Figura 7-1 - Distribuição espacial da sondagem geológica a longo prazo no depósito N1.	77
Figura 7-2 - Distribuição espacial da sondagem geológica de longo prazo nos depósitos de N2 e N3.	77
Figura 7-3 - Distribuição espacial da perfuração geológica de longo prazo nos depósitos de N4E e N4W... ..	78
Figura 7-4 - Distribuição espacial da perfuração geológica de longo prazo na porção sul dos depósitos de N4E e N4W.	79
Figura 7-5 - Distribuição espacial da perfuração geológica de longo prazo no depósito de N5.	80
Figura 7-6 - Classificações de RMR e Rocha Frágil em função da resistência dos materiais (Modificadas de Martin & Stacey (2018).	85
Figura 8-1 - Regressão linear entre a densidade mineralógica e a densidade de base seca medida para amostras friáveis (esquerda) e compactas (direita), segundo Motta et al. (2016).	95
Figura 10-1 - Resultados do teste de trabalho de Concentração Magnética de Pellet Feed.	100
Figura 11-1 - Fluxograma de macroprocessos de modelagem, estimativa de teor e classificação do inventário mineral de depósitos ferrosos.....	103
Figura 11-2 - Disposição das seções geológicas verticais interpretadas no Modelo N1	105
Figura 11-3 - Seções geológicas verticais típicas da porção norte da Mina N5	106
Figura 11-4 - Fluxograma de macroprocessos para modelagem e estimativa de teores e classificação do inventário mineral de depósitos de minério de ferro.....	108
Figura 11-5 - Comparação entre a seção vertical geológica interpretada (SV_025) e a seção do modelo de blocos.....	110

Figura 11-6 - Comparação entre a seção vertical geológica interpretada (SV_10) e a seção do modelo de blocos.....	112
Figura 11-7 - Análise de galeria	113
Figura 11-8 – Comparação entre a seção vertical geológica interpretada (SV_13) e a mesma seção no modelo de blocos.....	114
Figura 11-9 – Comparação volumétrica entre lito (atributo final do litotipo), Lito_ik (estimativa por IK) e Lito_nn (estimativa por NN) da hematita friável do modelo N3.....	115
Figura 11-10 - Comparação entre a seção vertical geológica interpretada (SV_0100N) e a seção do modelo de blocos.....	117
Figura 11-11 – Comparação volumétrica entre lito (litotipo identificado final), lito_ik (estimativa por IK) e lito_nn (estimativa por NN) da hematita friável do modelo de mina N4.....	117
Figura 11-12 – Comparação entre a seção vertical geológica interpretada e a seção no modelo de blocos	119
Figura 11-13 – Comparação volumétrica entre lito (identificação do litotipo final, no modelo de blocos), lito_ik (estimativa IK) e lito_nn (estimativa NN) para hematite friável do modelo de mina N5	120
Figura 11-14 - Detalhe do furo de sondagem na seção geológica vertical mostrando as classificações visual (CLV) e matemática (CLM), teores de ferro (Fe) e manganês (Mn) e as porcentagens de massa retida em G1 (>8 mm), nos diferentes litotipos (mudanças bruscas nos valores indicam a presença de contato).	121
Figura 11-15 - Média global de Fe na região de contato entre hematita friável (HF) e jaspilito (JP).....	121
Figura 11-16 - Detalhe de uma seção geológica vertical mostrando as classificações interpretada (CLI), matemática (CLM) e visual (CLV), além dos teores de ferro (Fe) e manganês (Mn) e porcentagens de massa retida no G1 (> 8 mm).	122
Figura 11-17 - Gráfico box-plot e estatísticas descritivas de teores globais de Fe.....	124
Figura 11-18 - Modelo variográfico FEGL para estimativa de teor, exemplo de depósito N1	127
Figura 11-19 - Parâmetros de busca para o modelo N3.....	129
Figura 11-20 - Elipsoide de busca para estimar teores da mina N4	130
Figura 11-21 - Elipsoide de busca dos teores estimados da mina N5, Norte-4200.....	130
Figura 11-22 - Fluxograma de pós-processamento da estimativa de teor.....	133
Figura 11-23 - Representação gráfica do cálculo de IR e limites de classe	138
Figura 11-24 - Comparação visual entre os métodos de classificação na elevação 525 na mina N5, região do Morro1: dilatação/erosão (esquerda) e Índice de Risco (direita).	140
Figura 11-25 - Verificação global do enviesamento de ferro de hematitas friáveis (HF) para N2	142
Figura 11-26 - Comparação visual do modelo geológico (esquerda) com os teores globais estimados de ferro (direita) para bancada 622,5.....	143
Figura 11-27 - Número médio de amostras por classe de inventário mineral do modelo N2.....	144
Figura 11-28 - Limites de DMs da Vale e limites da caixa de modelo geológico da Serra Norte (polígonos azuis), concessão de mineração da Vale em amarelo.....	147
Figura 13-1 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N1.....	156
Figura 13-2 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N2.....	157
Figura 13-3 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N3.....	157

Figura 13-4 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N4E.	158
Figura 13-5 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N4W.	159
Figura 13-6 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N5.	160
Figura 13-7 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N1.	163
Figura 13-8 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N2.	165
Figura 13-9 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N3.	166
Figura 13-10 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N4W.	167
Figura 13-11 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N4E.	168
Figura 13-12 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N5.	169
Figura 13-13 - Equipotenciais máximos de rebaixamento nas minas N1 e N2.	172
Figura 13-14 - Equipotenciais máximos de rebaixamento na mina N3.	173
Figura 13-15 - Equipotenciais máximos de rebaixamento na mina N4.	174
Figura 13-16 - Equipotenciais máximos de rebaixamento na mina N5.	174
Figura 13-17 - Vida Útil da Mina vs Teores de Fe.	175
Figura 14-1 - Fluxograma da Planta I.	180
Figura 14-2 - Fluxograma da Planta II.	181
Figura 14-3 - Fluxograma da Planta III.	182
Figura 15-1 – Mapa da infraestrutura.	185
Figura 16-1 - Minério de ferro 62% preços (US\$/tonelada métrica seca)	190
Figura 17-1 - Precipitação anual da Serra Norte.	196
Figura 17-2 - Conceitualização dos termos aplicáveis ao fechamento de mina na Vale.	200
Figura 17-3 – Gráfico das visões ARO, LoA, LoM and SLoMARO, LoA, LoM e SLoM.	201
Figura 17-4 - Condição no final da operação - Minas Azul, N1, N2 e N3.	204
Figura 17-5 - Condição no final da operação em N4 e N5.	204
Figure 19-1 – Resultado gráfico do Fluxo de Caixa.	212
Figura 19-2 - Análise de Sensibilidade.	213

Lista de Tabelas

Tabela 1-1 – Resumo da sondagem	15
Tabela 1-2 Recursos minerais medidos e indicados, exclusivos de reservas minerais	18
Tabela 1-3 Recursos minerais inferidos exclusivos de reservas minerais.....	19
Tabela 1-4 - Declaração de Reserva Mineral Provada e Provável 2021	20
Tabela 1-5 - Estimativa de Custo de Capital - LOM.....	23
Tabela 1-6 - Despesas e Custos Operacionais.....	23
Tabela 1-7 – Taxa de câmbio	24
Tabela 1-8 – Avaliação Econômica	25
Tabela 2-1 - Visitas ao local de PQs	27
Tabela 2-2 – Lista de PQs.....	28
Tabela 2-3 - Unidades de medida usadas neste relatório.....	29
Tabela 2-4 - Lista de abreviações usadas neste relatório.....	30
Tabela 2-5 - Lista de símbolos químicos usados neste relatório	33
Tabela 3-1 - Direitos de Mineração Serra Norte formando o Agrupamento de Concessão	37
Tabela 5-1 - Produção anterior das minas da Serra Norte.	43
Tabela 6-1 - características da mineralização em N2	65
Tabela 6-2 - características da mineralização em N3.....	65
Tabela 6-3 - características da mineralização em N4	69
Tabela 6-4 - características da mineralização em N5.....	73
Tabela 7-1 - Distribuição das campanhas de sondagem ao longo dos anos em todos os depósitos da Serra Norte.	75
Tabela 7-2 - Valores típicos dos critérios de aceitação de FoS. Fonte: Modificada de Read & Stacey (2009)	87
Tabela 9-1 - Verificação de dados externos, Operações da Serra Norte.	98
Tabela 11-1 - Parâmetros usados nos planos de estimativa de litotipo.....	110
Tabela 11-2 - Parâmetros usados nos planos de estimativa de litotipo.....	111
Tabela 11-3 - Lista de litotipos modelados por sólido (3D) e/ou estimados por IK.....	113
Tabela 11-4 - Parâmetros usados nos planos de estimativa de litotipo.....	114
Tabela 11-5 - Lista de litotipos modelados por 3D e os estimados por IK.....	116
Tabela 11-6 - Parâmetros de estimativa do indicador litológico.....	116
Tabela 11-7 - Parâmetros de estimativa do indicador litológico.....	119
Tabela 11-8 - Chave de classificação matemática da Serra Norte	120
Tabela 11-9 - Parâmetros utilizados na estimativa dos teores globais e granuloquímica do modelo N1	128
Tabela 11-10 - Parâmetros adotados na estimativa dos teores do modelo N2.....	128
Tabela 11-11 - Parâmetros utilizados na estimativa do teor global e granuloquímica do modelo N4	129
Tabela 11-12 - Parâmetros utilizados na estimativa de teores globais e granuloquímica do modelo N5	130
Tabela 11-13 - Resumo das densidades de depósito N1	134
Tabela 11-14 - Resumo das densidades e umidades do depósito de N2	134
Tabela 11-15 - Resumo das densidades e umidades do depósito de N3	134

Tabela 11-16 - Resumo das densidades e umidades do mina N4	135
Tabela 11-17 - Resumo das densidades e umidades para a mina N5	135
Tabela 11-18 - Configuração do Modelo de Blocos de N1	135
Tabela 11-19 - Configuração do Modelo de Blocos de N2	136
Tabela 11-20 - Configuração do Modelo de Blocos de N3	136
Tabela 11-21 - Configuração do Modelo de Blocos de N4	136
Tabela 11-22 - Configuração do Modelo de Blocos de N5	136
Tabela 11-23 - Indicadores utilizados para caracterizar as litologias consideradas como estéril e minério dos depósitos da Serra Norte	138
Tabela 11-24 - Comparação entre teores estimados de krigagem e amostras regularizadas para N2	141
Tabela 11-25 - Parâmetros geotécnicos	146
Tabela 11-26 – Recursos Minerais exclusivos das Reservas de depósito N1 por litotipo.....	148
Tabela 11-27 – Recursos Minerais (Reservas Minerais excluídas) de depósitos N2 por litotipo	148
Tabela 11-28 – Recursos Minerais (Reservas Minerais excluídas) de depósitos N3 por litotipo	149
Tabela 11-29 – Recursos Minerais exclusivos das Reservas de depósito N4E por litotipo	149
Tabela 11-30 – Recursos Minerais exclusivos das Reservas de depósito N4W por litotipo	149
Tabela 11-31 – Recursos Minerais exclusivos das Reservas de depósito N5 por litotipo.....	149
Tabela 12-1 - Estimativa de reserva mineral.....	151
Tabela 12-2: Parâmetros de teor de corte para a planta da Serra Norte.....	153
Tabela 13-1 - Relatórios resumidos utilizados para construção do modelo estrutural e modelo geomecânico 3D – Complexo de Minas de Serra Norte.....	161
Tabela 13-2 - Relatórios de testes laboratoriais geotécnicos - Complexo de Minas de Serra Norte	162
Tabela 13-3 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N1	163
Tabela 13-4 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N2	165
Tabela 13-5 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N3	166
Tabela 13-6 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N4	169
Tabela 13-7 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N5	171
Tabela 13-8 - Equipamentos de mineração	177
Tabela 13-9 - Força de trabalho da Vale.....	177
Tabela 13-10 - Força de Trabalho da Contratada.....	177
Tabela 14-1 - Recuperações, Utilização e Capacidades da Planta	178
Tabela 14-2 - ROM, produção, recuperação e qualidade realizados	182
Tabela 14-3 - Lista de equipamentos das Plantas I, II e III	182
Tabela 15-1- Depósito de Resíduos em operação.....	187
Tabela 15-2 - Depósito de Resíduos em desenvolvimento.....	187
Tabela 16-1 - VIU por ponto percentual adicional de Fe (USD/tonelada métrica seca)	191
Tabela 16-2 - Platts de minério de ferro para 62% Fe (USD/tonelada métrica seca).....	191
Tabela 17-1 - Permissão Ambiental na Serra Norte	195
Tabela 17-2 - Processos para o complexo Serra Norte	195
Tabela 17-3 - Atividades de fechamento - Cavas	202
Tabela 17-4 - Atividades de fechamento - Pilha de Resíduos	202

Tabela 17-5 - Atividades de fechamento - Sistema de Contenção de Sedimentos.....	203
Tabela 17-6 - Atividades de fechamento – instalações industriais e infraestrutura de apoio	203
Tabela 17-7 - Monitoramento e Manutenção Pós-Fechamento.....	205
Tabela 17-8 - Provisão de recursos financeiros para a desmobilização de ativos utilizando o modelo ARO para 2021	207
Tabela 18-1 - Estimativa de Custo de Capital de LOM	208
Tabela 18-2 - Despesas e Custos Operacionais.....	209
Tabela 18-3 - Força de trabalho da Vale	209
Tabela 18-4 – Força de trabalho da contratada	209
Tabela 19-1 – Tabela com os resultados do Fluxo de Caixa ⁽¹⁾	211
Tabela 19-2 - Análise do fluxo de caixa	212

1. Sumário Executivo

1.1. Introdução

O objetivo deste Resumo do Relatório Técnico é informar os recursos minerais e as reservas minerais das minas do Complexo Serra Norte para cumprir os requisitos de divulgação de propriedade da Comissão de Valores Mobiliários (SEC) dos EUA. Isso é necessário para as companhias registradas de mineração, conforme descrito na Subparte 229 do Regulamento S-K 1300 e divulgado pelos envolvidos nas operações de mineração (S-K 1300) e no item 601 (b) (96) Resumo do Relatório Técnico.

A VALE é uma das maiores mineradoras do mundo, grande exportadora brasileira e uma das principais empresas privadas do Brasil. Com operações nos cinco continentes, a empresa possui uma base global e diversificada de acionistas e suas ações são negociadas nas principais bolsas de valores do mundo. Líder mundial na produção de minério de ferro, pelotas e níquel, a VALE também produz manganês, ferroligas, carvão, cobre, ouro, prata, cobalto e metais do grupo platina. Seus minérios são de alta qualidade e produzidos para atender de forma competitiva as necessidades dos clientes da indústria siderúrgica em todo o mundo. Para entregar produtos com rapidez, a empresa de mineração opera globalmente uma cadeia logística integrada e eficiente, que inclui ferrovias, terminais marítimos e portos, além de estações de transferência flutuantes e centros de distribuição.

O Complexo Serra Norte faz parte do Sistema Norte da Vale, localizado no sudeste do estado do Pará, no Norte do Brasil. Vários processos geológicos nessa região também formaram grandes depósitos de manganês, ouro, cobre, paládio, platina e níquel. Essa riqueza mineral faz da região de Carajás a área geologicamente mais importante e bem estudada no Norte do Brasil.

1.2. Descrição da propriedade

O Complexo Serra Norte está inserido no processo de mineração 813.682/1969 e está na fase de concessão mineira. Todos os depósitos minerais estão dentro da Floresta Nacional de Carajás e não interferem nas propriedades de terceiros.

O Complexo Serra Norte corresponde aos depósitos denominados N1, N2, N3, N4 e N5. As minas em operação são N4E, N4W e N5. Existem quatro plantas de processamento: Planta I (capacidade de 85Mt/ano), Planta II (capacidade de 40Mt/ano), Planta III (capacidade de 18Mt/ano) e Planta IV (capacidade de 3Mt/ano).

Os projetos N1 e N2 estão programados para iniciar em 2026 e o projeto N3 deve iniciar em 2023. Esses projetos não exigirão a implementação de novas estruturas para processamento mineral, suporte, temporário ou permanente. Essas necessidades serão atendidas por estruturas já em operação no Complexo de Mineração de Ferro Carajás. Todas as estruturas existentes estão devidamente licenciadas.

O Complexo Serra Norte tem quatro servidões de lavra que são contíguas e formam um contorno único que circunscreve todas as instalações industriais atuais e futuras do Complexo Serra Norte. Duas das servidões estão autorizadas e duas estão em fase de aprovação.

1.3. História

As pesquisas geológicas na Serra dos Carajás começaram em 1922, mas as primeiras citações sobre a ocorrência de formações ferríferas datam de 1933. Na Carta do Brasil ao Milionésimo, publicada pelo IBGE em 1960, na fotografia aérea, podem ser vistos as jazidas C e D da Serra Sul, que foram inicialmente mal interpretadas como “platôs de calcário com lagos elevados no sul do Pará”. A partir de 1967, vários trabalhos detalhados começaram a ser realizados nos diferentes alvos que compõem as áreas conhecidas como Serra Norte, Serra Sul e Serra Leste.

Em 1977, a VALE (na época Companhia Vale do Rio Doce – CVRD) adquiriu a participação acionária na United States Steel (USS), sendo a única responsável pela realização do projeto. Em 1979, teve início a construção do complexo, integrando a mina, a ferrovia e o porto, do Projeto Ferro Carajás. Em fevereiro de 1985, a ferrovia São Luiz – Carajás foi concluída. A produção de minério de ferro começou em 1984, o depósito de N4E e o depósito de N4W entraram em operação em 1994.

1.4. Geologia e mineralização

Os principais depósitos de minério de ferro de Carajás estão associados a platôs elevados de topo plano, em geral, áreas elevadas, entre 650-800 metros, definidos ao longo de dois principais alinhamentos morfológicos correspondentes à Serra Norte e Serra Sul. Esses alinhamentos materializam os membros do Sinclinal de Carajás.

O Complexo Serra Norte corresponde ao domínio geológico do flanco invertido do Sinclinal de Carajás. O alto padrão de deformação deste domínio se reflete na geometria e distribuição das formações ferríferas, cuja segmentação por falhas e dobras de diferentes orientações e escalas, individualiza os platôs de N1 a N9.

Os platôs do Complexo Serra Norte são limitados ao norte pelo domínio das rochas vulcânicas da Formação Parauapebas e ao sul, pelo domínio dos sedimentos terrígenos da Formação Águas Claras.

Nos platôs N4 e N5, onde existem cavas, as informações geológicas foram obtidas por mapeamento em escala 1:2000, sondagem diamantada, trincheiras e canais. Portanto, em N1, N2 e N3, a maior parte das informações geológicas foi obtida a partir de testemunhos de sondagem diamantada e mapeamento de superfície de materiais de alteração devido à desagregação forte/profunda e a ausência de cortes e escavações, tornando os afloramentos escassos.

A mineralização do Complexo Serra Norte é formada principalmente pela alteração supergênica do jaspilito, que constitui o protólito de Carajás. O minério de alto teor é representado principalmente por hematita friável, a canga estruturada também é considerada como um litotipo mineralizado.

O depósito N1 fica no extremo oeste da Serra Norte e corresponde a parte do platô homônimo. Este platô tem uma forma alongada na direção NW-SE. É composto predominantemente por rochas das formações Carajás e Igarapé Cigarra. Em geral, as camadas apresentam ângulos de inclinação médio a alto para o nordeste, configurando uma pilha estratigráfica invertida. A espessura da camada varia entre 250-600 m e é fortemente controlada por dobras e falhas.

Os depósitos N2 e N3 estão localizados nos platôs homônimos, com formato alongado na direção E-W, na porção central da Serra Norte. As rochas da Formação Igarapé Cigarra são predominantes nesses platôs. Em geral, as camadas apresentam ângulo de inclinação médio a alto para o norte, configurando um empilhamento estratigráfico invertido.

A maioria das formações ferríferas dos platôs N2 e N3 foram atribuídas à Formação Igarapé Cigarra, não se destacam no relevo devido à baixa espessura. Os controles estruturais e sua ordem cronológica relativa são semelhantes aos descritos para N1, diferenciando-se pela baixa continuidade das formações ferríferas, o que reflete a importância das falhas para a estrutura geológica local.

O platô N4 fica na porção centro-leste da Serra Norte, onde existem várias cavas de mina, distribuídas ao longo do platô homônimo. As dimensões de N4 são grandes e é composta por rochas das formações Carajás, Parauapebas e Igarapé Cigarra, com formato tabular e inclinação geral a oeste, configurando um empilhamento estratigráfico normal. Antes do início da lavra, o platô já era dividido nas porções leste e oeste por uma drenagem que separa os dois principais corpos de formações ferríferas.

A Formação Carajás ocorre continuamente na porção central dos platôs e corresponde ao domínio com maior espessura das formações ferríferas, que são fortemente controladas por falhas de rejeito direcional e apresentam espessura entre 200-500 metros.

No platô N4, a Formação Carajás assume forte tendência de N-S e define dois cinturões de ocorrência denominados N4W e N4E, com padrão estrutural distinto, separados por uma falha de cavalgamento na borda leste. A região N4W é relativamente mais simples e se comporta como um homoclinal, a região N4E é mais complexa, dada a rotação do bandamento, dobramento na porção sul e arraste ao longo das grandes falhas de rejeito direcional dextral.

O platô N5 fica no extremo leste da Serra Norte, onde existem cinco cavas denominadas N5W, N5N, N5E, N5S e M1, distribuídas ao longo do platô homônimo. Este platô possui uma geometria alongada na direção NNW-SSE, sofrendo forte curvatura na porção centro-norte como reflexo da interferência por dobramento. As formações ferríferas ocupam a porção central das camadas do platô e apresentam uma inclinação geral na direção oeste, configurado em um empilhamento estratigráfico normal. Em N5, a Formação Carajás se comporta como um homoclinal, com uma tendência que varia de NW-SE a N-S e mergulhos para SE e E. O caráter sinuoso na porção norte do platô se dá em função de um sinclinal que, associada ao sistema de falhas, verificado em todo o platô, controla a geometria da formação ferrífera.

1.5. Exploração, sondagem e amostragem

1.5.1. Exploração

O trabalho de exploração se baseia inicialmente em destaques do mapeamento regional em uma escala de 1:100 000 produzido pela Pesquisa Geológica do Brasil (CPRM). O trabalho detalhado é desenvolvido com mapeamento em diferentes escalas e sondagem realizada pela equipe da Vale.

Dentro e ao redor das áreas da mina, as anomalias geofísicas são detalhadas com mapeamento e sondagem. O mapeamento geológico na escala 1:2.000 é realizado pela equipe de geologia de curto prazo, atualizado mensalmente nas minas N4 e N5. O trabalho é feito usando a precisão do GPS e as litologias mapeadas são classificadas de acordo com a classificação visual e a compatibilidade.

1.5.2. Sondagem

O trabalho de exploração realizado em Carajás começou no final da década de 1960 e início da década de 1970, abrangendo áreas da Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e São Félix do Xingu, todas com grande potencial para recursos geológicos de minério de ferro.

Campanhas de sondagem de longo prazo foram realizadas em grades espaçadas de 200x200m em todos os depósitos e fechamentos da Serra Norte de 100x100m, 100x50m, até 50x50m, principalmente nas áreas de lavra. Um resumo da sondagem por área é apresentado na Tabela 1-1.

Tabela 1-1 – Resumo da sondagem

Depósito	Sondagem total (m)
N1	56.783,26
N2	9.401,03
N3	33.968,70
N4	385.436,50
N5	250.947,80

1.5.3. Hidrologia

Os modelos de águas subterrâneas foram preparados usando software de modelagem de água padrão da indústria para dar suporte a permissões para desaguamento. Os modelos hidrogeológicos são ferramentas utilizadas para representar a dinâmica das águas subterrâneas de forma simplificada e possibilitar a simulação de diferentes cenários.

Os softwares de modelagem numérica FEFLOW e MODFLOW foram utilizados pela Hidrovia em 2020 e pela MDGEO em 2020 e 2021 para as simulações de rebaixamento do lençol freático para cavas a céu aberto N1, N2, N3, N4 e N5. O fluxo simulado será de cerca de 5.530 m³/h, sendo 670 m³/h na cava N1 (FEFLOW / Hidrovia, 2020), 164 m³/h para N2 (FEFLOW / Hidrovia, 2020), 570 m³/h para N3 (MODFLOW / MDGEO, 2021), 2.636 m³/h para N4 (MODFLOW / MDGEO 2020) e 1.490 m³/h (MODFLOW / MDGEO, 2020). Para calibrar os modelos, foram utilizados 78 instrumentos.

O banco de dados utilizado foi considerado satisfatório para atingir o objetivo principal, que consiste em construir, calibrar e simular futuros cenários de lavra em um modelo numérico de águas subterrâneas para fornecer dados de nível de água que serão utilizados como parâmetro de entrada para a análise de estabilidade geotécnica e garantir a operação da cava seca e taludes despressurizados.

1.5.4. Geotecnia

A descrição de testemunhos, o mapeamento de superfície e os testes laboratoriais são a principal fonte de informações geotécnicas. Para descrição de testemunhos e mapeamento, os dados coletados seguem as tabelas propostas pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas e Engenharia das Rochas (1997), Bieniawski (1989) e Martin & Stacey (2018) ajustadas pela Vale (2019) para se ajustarem aos depósitos de formação ferrífera. Esses parâmetros de caracterização são aplicados para definir diferentes sistemas de classificação de maciços rochosos e para construir o modelo geomecânico.

Uma combinação de locais históricos mais próximos e dados geotécnicos atuais, com a experiência local de equipes internas apoiadas por consultores nacionais e internacionais, é usada para estabelecer diretrizes e procedimentos internos no projeto e operação de estabilidade de talude para as cavas N1, N2, N3, N4 e N5.

1.5.5. Amostragem

A amostragem de testemunho é realizada de acordo com os procedimentos de governança corporativa e segue os padrões da indústria de mineração. A eficiência dos processos de amostragem e análise laboratorial aplicados nas operações do Complexo Serra Norte é assegurada por revisões e/ou auditorias periódicas.

1.5.6. Determinações de densidade

O banco de dados de densidade é composto por amostras coletadas por métodos convencionais, como deslocamento de volume, enchimento de volume, frasco de areia e pesagem hidrostática, bem como dados de levantamento geofísico (gama-gama). Esses dados são combinados com técnicas de cálculo mineralógico normativo para atribuir os valores de densidade final no modelo geológico.

A tonelagem relatada nas minas do Complexo Serra Norte corresponde à base natural, portanto, é muito importante determinar os valores médios de umidade para cada litologia. Esses valores são obtidos por testes, secando uma alíquota da amostra e comparando a massa seca e úmida da amostra.

1.5.7. Preparação e análise de amostras

A preparação física e os ensaios químicos dos testemunhos de furo de sondagem nos depósitos da Serra Norte foram realizados de acordo com procedimentos que variaram ao longo do tempo. Durante as diferentes campanhas de sondagem realizadas, as amostras foram analisadas em diferentes fluxogramas analíticos e posteriormente agrupadas em cinco fluxogramas. As principais diferenças entre elas são o número de frações de tamanho das partículas, o número de frações de tamanho com análise química e os analitos medidos, além do tipo de peneiramento (seco ou úmido).

Para a modelagem geológica, as amostras foram agrupadas nas seguintes faixas de tamanho das partículas: G1: +8 mm; G2: -8+0,15 mm e G3: -0,15 mm, com G1 e G2, subdividido em G1A: +19 mm, G1B: -19+8 mm, G2A: -8+1 mm e G2B: -1 mm+0,15. O banco de dados do modelo geológico de longo prazo contém resultados analíticos para Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, LOI, CaO, MgO, TiO₂, FeO, K₂O e Cu. O banco de dados de curto prazo contém os analitos Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, LOI, CaO, MgO e TiO₂.

1.5.8. Garantia de qualidade e controle de qualidade

O tratamento e a avaliação de dados históricos de QA/QC (anteriores a 2012) relativos a amostras de controle, amostras gêmeas, duplicatas de campo, duplicatas de material britado, duplicatas de material pulverizado, duplicatas e padrões externos não revelaram pontos de atenção (em frequência e/ou magnitude) quanto à precisão e exatidão (de amostragem e ensaios químicos) que comprometem os bancos de dados utilizados para fins de modelagem geológica e estimativa de recursos, classificação de recursos e reservas de áreas e minas nos Complexos Serra Norte e Serra Sul da Província Mineral de Carajás.

Após a avaliação dos resultados dos dados de QA/QC para o período de 2012 a 2019, na maioria dos casos, as precisões de ensaios químicos/amostragem são boas e as falhas/vieses analíticos são pequenos ou insignificantes em comparação com as faixas de classe envolvidas. A investigação dos pontos de atenção mais relevantes já foi solicitada aos responsáveis (equipes de geologia e laboratórios envolvidos). Os dados de QA/QC revelaram indicadores gerais de não conformidade, precisão e exatidão considerados satisfatórios, não comprometendo o banco de dados relacionado a eles.

1.6. Verificação de dados

A Vale tinha procedimentos de coleta de dados que incluíam várias etapas de verificação destinadas a garantir a integridade do banco de dados. A equipe da Vale também realizou análises regulares de sondagem, amostragem, laboratoriais e de banco de dados. Todos os registros técnicos relacionados aos perfis de furo de sondagem, trajetória geofísica e espacial, fotografias de caixas de testemunho, descrição, testes de densidade, amostras, petrografia, resultados físicos e químicos, entre outros, são mantidos em repositório(s) e/ou sistema(s) de tecnologia da informação adequados e acessíveis para verificação e/ou investigação, sempre que necessário.

Os recursos minerais e as reservas minerais são estimados de acordo com as Diretrizes e Padrões Ferrosos Globais e da Vale para os protocolos de Relatórios de Recursos Minerais e Reserva Mineral. Consequentemente, cada tópico é tratado pela pessoa qualificada/pessoas competentes do respectivo departamento: recursos, reservas, processamento mineral, geotecnia (cava, projeto e barragem), hidrogeologia, produção, estratégia, meio ambiente, espeleologia, finanças, direitos minerários, uso futuro de mina e engenharia.

Paralelamente às atividades de operação de mina, reconciliações periódicas são realizadas em cada local. O relatório anual consolidado de resultados, comparando o modelo de curto prazo, o recurso mineral e o modelo de reservas, além dos teores e toneladas de produção, são discutidos na reunião técnica anual para promover a melhoria contínua entre todas as áreas envolvidas.

1.7. Estimativa de recursos minerais

1.7.1. Metodologia de estimativa

A Vale possui um conjunto de protocolos e diretrizes para apoiar o processo de estimativa, que os estimadores devem seguir. Estes incluem: caracterização abrangente do domínio litológico e de mineralização; seleção de todas as amostras representativas dentro do(s) domínio(s); composição de informações do furo de sondagem em um tamanho de suporte consistente (comprimento, densidade, recuperação), validação por meio de estatísticas de comprimentos e variáveis antes e após a composição; compreensão abrangente dos caracteres estatísticos das variáveis; em cada domínio de estimativa e nos contatos entre domínios; caracterização da continuidade espacial de

cada variável a ser modelada (variogramas); compreensão da influência de outliers e variáveis com distribuições altamente enviesadas e seleção de uma estratégia de tratamento adequado (vizinhança restrita); distribuição espacial de dados de sondagem e de amostras, método de lavra e taxas de produção em consideração; seleção de uma técnica de modelagem adequada e definição dos parâmetros e opções adequados a serem usados (por exemplo, plano de krigagem, estratégia de busca, modelos de variogramas a serem usados, métodos de pós-processamento); validação das estimativas (inspeção visual, verificações de tendência global e local, confirmação do plano de krigagem e verificação do grau de suavização resultante da interpolação); e classificação de confiança.

A estimativa foi feita pelo pessoal da Vale. A estimativa de recursos minerais é suportada pela sondagem testemunhada. O software usado para estimativa inclui Vulcan, Leapfrog Geo e Isatis.

Os teores dos blocos foram estimados usando Krigagem Ordinária (OK) no software Vulcan enquanto a variografia é realizada no software Isatis. Os blocos foram estimados em uma única análise com algumas correções de pós-processamento. A estimativa do bloco foi concluída em um modelo de blocos de 25 m x 25 m x 15 m, exceção feita para o modelo de blocos SN3 com blocos de 12,5 m x 12,5 m x 15 m. A classificação dos blocos foi atribuída de acordo com a metodologia do Índice de Risco, que combina continuidade da jazida e erro de estimativa. Os blocos medidos estimados usando apenas um furo de sondagem foram rebaixados para os blocos indicados. Posteriormente, essa classificação automatizada foi comparada com o método de classificação geométrica regular para avaliar melhor a classificação.

Os recursos minerais foram confinados dentro de uma cava conceitual otimizada. As extensões de cava resultantes foram consideradas para razoabilidade, como qualquer impacto potencial na infraestrutura de mina planejada (instalações de processamento), adequação das atuais capacidades de pilhas de estéril projetadas. Os ângulos do talude inter-rampa da cava variam de acordo com a litologia e variam de 22 a 48°.

A Vale estabeleceu as previsões de preços de commodities utilizando uma abordagem consensual baseada em análises de longo prazo e previsões de bancos, complementadas com pesquisas feitas por especialistas internos da Vale. Esta abordagem é considerada razoável para apoiar as estimativas de recursos minerais.

1.7.2. Declaração de recursos minerais

Os recursos minerais são reportados usando as definições de recursos minerais estabelecidas no Regulamento S-K1300 e são relatados como exclusivos dos recursos minerais convertidos em reservas minerais. Um resumo das estimativas de recursos minerais adicionais às reservas é fornecido na Tabela 1.2 e na Tabela 1.3. Estimativas de recursos minerais declaradas como milhões de toneladas métricas, incluindo umidade e teor de %Fe seco.

Tabela 1-2 Recursos minerais medidos e indicados, exclusivos de reservas minerais

Complexo/Depósito	Medido		Indicado	
	Massa (Mt)	Teor (%Fe)	Massa (Mt)	Teor (%Fe)
N1	128,1	66,5	133,4	66,2
N2	1,8	66,1	18,2	65,3
N2	7,5	66,1	21,1	65,7
N4	190,0	65,7	138,3	65,6
N5	265,2	66,9	180,5	66,4
n	592,7	66,4	491,5	66,1

Notas para acompanhar as tabelas de recursos minerais:

1. A data efetiva da estimativa é 31/12/2021.

2. Tonelagem declarada em milhões de toneladas métricas incluindo 6,51% de teor de umidade e teor seco de %Fe. O ponto de referência utilizado são toneladas *in situ*.
3. A razoável expectativa de extração econômica foi determinada com base em um preço de longo prazo de US\$ 78/dmt para 62% de ferro.
4. Os números foram arredondados.

Tabela 1-3 Recursos minerais inferidos exclusivos de reservas minerais

Complexo/Depósito	Inferido	
	Massa (Mt)	Teor (%Fe)
Complexo Serra Norte	293,4	66,0
N1	52,8	66,3
N2	13,2	65,2
N2	24,0	66,1
N4	73,1	65,7
N5	130,3	66,2

Notas para acompanhar as tabelas de recursos minerais:

1. A data efetiva da estimativa é 31/12/2021.
2. Tonelagem declarada em milhões de toneladas métricas incluindo 6,51% de teor de umidade e teor seco de %Fe. O ponto de referência utilizado são toneladas *in situ*.
3. A razoável expectativa de extração econômica foi determinada com base em um preço de longo prazo de US\$ 78/dmt para 62% de ferro.
4. Os números foram arredondados.

As áreas de incerteza que podem afetar materialmente as estimativas de recursos minerais incluem: mudanças no preço do metal de longo prazo e premissas quanto à taxa de câmbio; mudanças nas interpretações locais de geometria de mineralização, estruturas e continuidade de zonas mineralizadas; mudanças na forma geológica e de teor e premissas geológicas e de continuidade de teor; mudanças nas premissas de entrada usadas para derivar a cava otimizada conceitual usada para restringir as estimativas; mudanças nas premissas de diluição de recuperação de lavra previstas; variações nos ângulos de talude geotécnico, premissas hidrogeológicas e de lavra; e mudanças nas premissas de licença ambiental, de permissão e social.

1.8. Estimativas de reserva mineral

As reservas de Serra Norte foram baseadas nos recursos medidos e indicados dos depósitos e N1, N2, N3 e N4, respectivamente, que foram utilizados como entrada e convertidos em provados e prováveis após a estimativa das reservas. Mais detalhes sobre estes aspectos podem ser vistos nos capítulos 12 e 13.

A cava otimizada considerou as restrições ambientais e algumas restrições de estrutura, custos de processo e de lavra também foram usados, que consideram os custos adicionais de aprofundamento, os custos de vendas, a curva de preço de commodity e os parâmetros geotécnicos. Os fatores de diluição e recuperação da lavra também foram considerados.

Com base nesses parâmetros, é gerada um conjunto de cavas, e a escolha é feita com base em critérios econômicos. Esta cava passa por uma primeira avaliação geotécnica e, em seguida, é otimizada novamente, onde correções de alguns parâmetros geotécnicos são feitas. Após esta segunda rodada, a cava segue para operacionalização e uma análise geotécnica final para correções finais na geometria operacionalizada para garantir a segurança e a estabilidade dos taludes. Tabela 1-4 mostra os resultados da declaração de reserva.

Tabela 1-4 - Declaração de Reserva Mineral Provada e Provável 2021

Cava/Operação	Classificação	Tonelagem (Mt)	Fe (%)
N1	Provada		
	Provável	323,6	66,1
	Subtotal Provada + Provável	323,6	66,1
N2	Provada		
	Provável	42,9	66,3
	Subtotal Provada + Provável	42,9	66,3
N3	Provada		
	Provável	91,8	65,3
	Subtotal Provada + Provável	91,8	65,3
N4	Provada	337,7	66,5
	Provável	295,1	66,3
	Subtotal Provada + Provável	632,8	66,3
N5	Provada	126,6	65,0
	Provável	372,5	64,9
	Subtotal Provada + Provável	499,1	64,9
Total	Provada	464,3	66,1
	Provável	1125,9	65,7
	Total Provada + Provável	1590,2	65,8

Notas:

1. A estimativa tem data de vigência de 31/Dez/2021.
2. Estimativas da Reserva de Minério de Ferro declaradas como milhões de toneladas métricas, incluindo umidade e teor %Fe seco (Fe₂O₃); umidade da Serra Norte de 8,17%.
3. A estimativa que presume os métodos de lavra a céu aberto utiliza o seguinte parâmetro de entrada principal; o preço do minério de ferro de USD 70/dmt; custo de lavra de 1,9 USD/t extraído; custo de processo de 1,6 USD/t processado; outros custos incluem custo de venda de 37,1 USD/t de produto, recuperações de massa variável; ângulos de talude de cava que variam de 19° a 45°; Recuperação de lavra de 98,9% e diluição de 1,35%.
4. Os números foram arredondados.

Os seguintes fatores podem afetar a estimativa da reserva mineral: preços das commodities; taxa de câmbio do dólar americano; taxa de inflação brasileira; parâmetros geotécnicos (incluindo sismicidade) e hidrogeológicos; mudanças nos fluxos de entrada de capital e estimativas de custo operacional; mudanças nos projetos de cava em comparação com os atualmente planejados; premissa de inventário; capacidade da operação da mina para atender à taxa de produção anual; recuperações da planta de processo e a capacidade de controlar níveis de elementos deletérios dentro das expectativa do plano LOM; premissa de que as plantas 1 e 2 terão o desempenho esperado; capacidade de atender e manter licenças e permissões ambientais; e capacidade de manter a licença social para operar.

1.9. Métodos de lavra

Os métodos convencionais de lavra a céu aberto são usados nas minas da Serra Norte, com base em mão-de-obra e equipamentos internos. Todos os estudos de engenharia são de nível mínimo FEL2.

Os planos de produção visam a produção anual média de cerca de 100 Mt. Pode haver uma pequena variação dependendo da estratégia da empresa durante toda a vida da mina.

Parâmetros geotécnicos são fornecidos para cada cava. Procedimentos de inspeção periódica são seguidos para verificar a estabilidade de taludes, pilhas de estéril, barragens, diques e drenagens, a fim de garantir a segurança e a continuidade da operação.

Nas operações, principalmente grandes escavadeiras hidráulicas e de cabo são usadas para produzir minério e estéril. As carregadeiras também são usadas para garantir maior flexibilidade na lavra, bem como diferentes trabalhos de limpeza e backup para as escavadeiras, quando necessário. Uma frota de caminhões fora de estrada é usada para transportar material para os depósitos de estéril e britadores primários. Os tratores de esteiras são planejados para manter as áreas de produção e limpeza de bancada. Tratores com rodas, motoniveladoras e caminhões-pipa completam o restante da frota de equipamentos auxiliares.

1.10. Métodos de processamento e recuperação

O Complexo Serra Norte é de grande importância para o sistema de produção da Vale tanto em termos de volume quanto de qualidade. A capacidade instalada deste complexo é de 145 Mta, onde parte do ROM é processado usando umidade natural, e parte é úmido.

Os depósitos que constituem este complexo possibilitam a geração de produtos com teor de ferro de cerca de 65% com baixa variabilidade. Em plantas que processam ROM com umidade natural, há somente etapas de britagem e peneiramento e somente o produto Sinter Feed é gerado. Na planta que processa ROM úmido, além das operações de britagem e peneiramento, há uma etapa de concentração magnética para o processamento de partículas finas. Esta planta gera produtos Lump, Sinter Feed e Pellet Feed.

O produto Pellet Feed é destinado à planta de pelotização em São Luís. A concentração magnética foi instalada para melhorar a qualidade do produto Pellet Feed; tornando assim o pellet gerado na planta de pelotização de São Luís mais competitivo. A concentração magnética está em ramp up e para suportar a definição desta rota de processo, foram realizados testes de concentração magnética em escala piloto, que indicaram que esta rota permite aumentar o teor de ferro e reduzir o teor de contaminantes com recuperação de massa satisfatória.

1.11. Infraestrutura

A maior parte da infraestrutura para apoiar as operações de mina está instalada. Existe um centro urbano próximo às operações de Carajás que absorve parte da força de trabalho, e outra parte reside na cidade de Parauapebas e região.

A água pode ser captada de cursos d'água selecionados e poços de rebaixamento sob licenças concedidas. A água de reposição para o processo é proveniente das barragens de Gelado e Pera. A água potável também é proveniente de poços localizados na mina. Esta água é tratada na Planta de Tratamento de Água. As Operações Serra Norte monitoram regularmente os níveis de água, fluxos e balanços.

A eletricidade é fornecida pelo Sistema Interconectado Nacional e conectada à tensão de 230 KV.

O sistema de distribuição interna é realizado por meio de redes elétricas próprias da Vale de 34,5 kV. O consumo em 2020 foi de cerca de 468.794,24 MWh, 68,87% dos quais alimentaram as plantas de processamento mineral, 27,57% foram distribuídos para as minas N4/N5 e os 3,56% restantes foram consumidos pelo Centro Urbano e outras estruturas de apoio.

1.12. Estudos ambientais, permissões e planos, negociações ou acordos com indivíduos ou grupos locais

As operações da Vale em Carajás começaram na década de 1980 com a abertura da Mina N4, em um momento em que a legislação ambiental no Brasil começava a surgir e a necessidade de estudos ambientais básicos não era rigorosamente aplicada em relação aos dias de hoje.

Na década de 2000, após a criação da Floresta Nacional de Carajás, a Vale iniciou um processo de licenciamento com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), apresentando estudos ambientais atualizados, criando uma nova linha de base de acordo

com a legislação da época quanto ao uso da terra, topografia, geologia regional, geologia do local e mineralogia, solo, hidrologia climática, hidrogeologia, meio biótico, plano socioeconômico e de fechamento de mina.

À medida que as minas e instalações continuam a se expandir, foram realizados estudos ambientais de apoio para avaliar as condições ambientais e apoiar o IBAMA para decidir sobre a licença ambiental, com destaque para o estudo denominado Global, realizado em 2010, que criou uma nova linha de base ambiental em Serra Norte (N4 e N5).

Os estudos de caracterização foram concluídos para todos os meios ambientais, incluindo solo, água, resíduos, ar, ruído e fechamento. Planos e Programas foram desenvolvidos e implementados para todos os locais das Minas N4 e N5, já em operação.

A atual licença de operação está em processo de análise pelo IBAMA, para a 10ª renovação.

Além disso, estão em andamento processos para obtenção de licença preliminar para minas a céu aberto e instalações de processamento para N1, N2 e N3, que apoiarão a substituição do volume de produção no complexo de mineração Serra Norte e outros estudos para apoiar a discussão com a agência de licenciamento para reduzir o raio da cavidade e modificar o Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás para liberar áreas a serem lavradas.

1.13. Estudos de mercado

O minério de ferro é um dos principais produtos que a Vale comercializa globalmente. Seu preço e prêmios podem flutuar ao longo do ano de acordo com mudanças no equilíbrio entre oferta e demanda e tendências de curto prazo no sentimento do mercado.

Os mercados globais de minério de ferro e pelotas de minério de ferro são altamente competitivos. Os principais fatores que afetam a concorrência são preço, qualidade e variedade de produtos oferecidos, confiabilidade, custos operacionais e custos de envio.

A Vale estabeleceu as previsões de preços de commodities usando uma abordagem de consenso baseada em previsões de longo prazo de analistas e bancos. O único objetivo dos números apresentados é demonstrar a viabilidade econômica da reserva mineral, portanto, pode diferir de outras informações que publicamos e não deve ser considerada como *guidance*.

Quando este relatório foi elaborado, o consenso de preço para os preços do minério de ferro a 62% Fe em 2022 dos analistas era de US\$ 112/t, com tendência de queda até que os preços atinjam o nível de longo prazo de cerca de US\$ 70/t e o consenso de preço para os preços do minério de ferro a 65% Fe em 2022 dos analistas foi de US\$ 127/t com tendência de queda até que os preços atinjam o nível de longo prazo de cerca de US\$ 84/t. Adicionalmente, acreditamos que a produção futura esperada, relativa às nossas reservas de minério de ferro, pode ser absorvida pelo mercado no longo prazo dada a demanda esperada pelos analistas de mercado.

1.14. Estimativas de custos de capital

As avaliações econômicas consideram o capital de investimento corrente nos fluxos de caixa, necessários para a manutenção de ativos/operações existentes e projetos de capital que visam manter e/ou aumentar a capacidade produtiva. O capital de investimento corrente pode ser classificado em rotineiro e não rotineiro.

Rotineiro refere-se a projetos destinados a manter a capacidade operacional dos ativos, incluindo aquisição e substituição de equipamentos e reajuste de estruturas operacionais. Eles são estimados com base em um diagnóstico feito pela área de Engenharia sobre a base de ativos, um déficit de manutenção e o investimento, meta definida pela empresa para os próximos anos.

Não rotineiro refere-se a projetos que suportam a estratégia do negócio, garantindo a conformidade com o plano de produção, mas que não ocorrem com frequência. Incluídos nesta lista: expansão de cavas, projetos de disposição de estéril e rejeitos, mudanças nos processos e tecnologias nas plantas, entre outros. Eles são estimados com base nas necessidades esperadas de cada operação ou complexo de produção no horizonte avaliado. Com base nessas necessidades, as equipes

multidisciplinares da Vale estimam os valores dos investimentos considerados nos fluxos de caixa das avaliações econômicas.

Além disso, avaliações econômicas das reservas consideram projetos de capital que visam manter e/ou aumentar a capacidade produtiva. A estimativa geral de custo de capital para LOM ou período de avaliação é de USD 6.202 milhões, conforme mostrado na Tabela 1-5.

Tabela 1-5 - Estimativa de Custo de Capital - LOM

Tipo de Custo de Capital	Unit	Value
Investimento Corrente	US\$ M	5.026
Não-rotineiro	US\$ M	1.126
Mina e planta	US\$ M	794
Pilha de estéril e rejeito	US\$ M	332
Rotina	US\$ M	3.900
Projetos de Capital	US\$ M	1.176
Mina e planta	US\$ M	119
Logística e Outros	US\$ M	1.056
TOTAL	US\$ M	6.202

Nota: números foram arredondados

1.15. Estimativas de custo operacional

As despesas e os custos operacionais são agrupados da seguinte forma:

- Opex de mina e planta: custos de mina e planta incluem lavra, processamento, armazenamento e transporte do minério para os pontos de carregamento;
- Custos de logística e distribuição: incluem ferrovias, portos, frete marítimo e centros de distribuição;
- Vendas, P&D e despesas pré-operacionais: estão relacionadas às despesas das equipes com vendas e escritórios, despesas com pesquisa e desenvolvimento de soluções para projetos e/ou manutenção de operações e despesas pré-operacionais, quando há projetos em implementação.

Em resumo, o Opex de mineração é previsto considerando os custos da operação ou operações similares em anos anteriores e seus respectivos indicadores operacionais como referência. Assim, os indicadores operacionais futuros são estimados com base no planejamento de mina de longo prazo. Dessa forma, os custos estimados são projetados considerando as futuras mudanças nos indicadores operacionais das operações.

As despesas e os custos operacionais unitários médios totais são de 33,0 USD/tonelada de produto. As despesas e o custo operacional unitário médio de LOM são compostos por:

- Mina e planta: 11,0 USD/tonelada de produto
- Logística e Distribuição: 19,3 USD/tonelada de produto
- Royalties: 2,5 USD/tonelada de produto
- Despesas de vendas, P&D, outros: 0,1 USD/tonelada de produto

A estimativa de custos e despesas gerais para LOM ou período de avaliação é de USD 51.872 milhões, conforme mostrado na Tabela 1-6.

Tabela 1-6 - Despesas e Custos Operacionais

Tipo de custos e despesas	Unidade	Valor
Mina e planta	USD M	17.264

Logística e Distribuição	USD M	30.378
Royalties	USD M	3.995
Despesas de vendas, P&D, outros	USD M	232
TOTAL de custos e despesas	USD M	51.872

Nota: números foram arredondados

1.16. Análise econômica

O objetivo da avaliação econômica apresentada neste capítulo é demonstrar a viabilidade econômica da reserva mineral, portanto, as taxas de produção, eficiências operacionais, custos e despesas, impostos e outras informações apresentadas podem diferir de outras informações que publicamos e não devem ser consideradas como *guidance*. Observe que nossa extração de produção planejada pode variar devido à exploração mineral contínua e estudos técnicos para adicionar novas reservas minerais.

1.16.1. Metodologia e premissas

A metodologia de avaliação econômica utilizada foi o Fluxo de Caixa Descontado (FCD), a principal metodologia utilizada para avaliar empresas, projetos, operações, etc., e amplamente utilizada por empresas, bancos de investimento e empresas de consultoria.

O fluxo de caixa previsto é composto pelas entradas de caixa (receitas) menos saídas de caixa (custos, despesas, impostos e despesas/custos de capital) de uma empresa em um determinado período. Esse período pode variar de acordo com o tamanho da Reserva Mineral associada ao ativo (mina, operação e logística). Quando o fluxo de caixa previsto trazido para o valor presente é positivo (maior ou igual a zero), isso significa que a empresa é economicamente viável.

Para a avaliação das reservas, os fluxos de caixa que a massa de produto pode gerar foram projetados. Para estimar as potenciais receitas anuais da lavra deste recurso, as toneladas e teores processados anuais, a recuperação do processo associado e os preços do metal foram levados em conta. Os custos operacionais, custos logísticos, royalties, impostos e gastos de capital necessários para seu uso econômico também foram estimados. Se o fluxo de caixa previsto, trazido para o valor presente pela taxa de desconto, for positivo, isso significa que o Recurso Mineral é economicamente lavrável e pode ser classificado como Reserva Mineral. A moeda usada para documentar o fluxo de caixa é USD e todos os custos e preços estão em dólares “reais” não escalonados. A taxa de câmbio de longo prazo (LT) prevista é mostrada na Tabela 1-7.

Tabela 1-7 – Taxa de câmbio

Taxa de câmbio – termos reais	2022	LT
R\$/US\$	5,25	5,00

O período dos fluxos de caixa das avaliações econômicas é o menor período entre 30 anos e o fim das reservas da operação ou projeto analisado. As avaliações econômicas das reservas assumem 100% de capital próprio, portanto não há despesas de amortização da dívida e juros nos fluxos de caixa. As receitas provenientes de avaliações econômicas das reservas de minério de ferro são baseadas em projeções de indicadores de preços do mercado internacional, como segue:

- Platts IODEX 62% Fe CFR China
- Índice de Fe 65% CFR China para a massa que irá gerar o produto IOCJ.
- VIU por ponto percentual adicional de Fe CFR China

Nas avaliações das operações e projetos que produzem pellet feed (PF) para abastecimento de nossas próprias usinas de pelotização, presume-se que o produto é vendido a terceiros a preço de mercado, sem considerar o processo de pelotização, ou seja, sem considerar os custos de processamento de pelotas e os prêmios de pelotas na receita.

1.16.2. Análise econômica

O modelo de avaliação econômica das reservas considerou o método de fluxo de caixa descontado e levou em conta as toneladas e teores anuais processados. A recuperação do processo associado, preços de metal, custos operacionais, custos logísticos, royalties e gastos de capital também foram considerados. A análise econômica confirmou que a Serra Norte é economicamente viável. O VPL pós-imposto com taxa de desconto de 7,5% é de USD 26,215 M. O resumo dos resultados da análise de fluxo de caixa é apresentado na Tabela 1-8.

Tabela 1-8 – Avaliação Econômica

Valor presente líquido do fluxo de caixa global	Unidade	Valor
Receita Total	US\$ M	70.616
Custos e despesas totais	US\$ M	-31.163
Mina e planta	US\$ M	-10.343
Logística e Distribuição	US\$ M	-18.150
Royalties	US\$ M	-2.459
Despesas de venda, P&D, outros	US\$ M	-142
Custos de Fechamento	US\$ M	-70
Impostos e variação de capital de giro	US\$ M	-9.134
Fluxo de caixa operacional	US\$ M	30.319
CAPEX Total	US\$ M	-4.104
Fluxo de caixa livre	US\$ M	26.215

1.16.3. Análise de sensibilidade

O maior impacto na análise de sensibilidade é o preço e VIU, seguindo pelo custo operacional da mina, planta, logística e distribuição, taxa de câmbio e custo de capital total (Capex).

Ao aplicar a análise de sensibilidade nas principais variáveis, o VPL permanece positivo, confirmando a robustez das reservas minerais.

2. Introdução

2.1. Termo de referência e objetivo

O objetivo deste Resumo do Relatório Técnico é informar os recursos minerais e as reservas minerais das minas do Complexo Serra Norte para cumprir os requisitos de divulgação de propriedade da Comissão de Valores Mobiliários (SEC) dos EUA. Isso é necessário para as companhias registradas de mineração, conforme descrito na Subparte 229 do Regulamento S-K 1300 e divulgado pelos envolvidos nas operações de mineração (S-K 1300) e no item 601 (b) (96) Resumo do Relatório Técnico.

As novas regras da SEC alinham os requisitos de divulgação com as práticas e padrões regulatórios globais, conforme incorporados nos padrões desenvolvidos pelo Comitê de Reservas Minerais e Padrões Internacionais de Relato (CRIRSCO) que a VALE está acostumada a usar. Como este é o primeiro Resumo do Relatório Técnico emitido pela VALE para o Complexo Serra Norte, não serão mencionados os relatórios previamente arquivados dessa natureza.

A data de vigência deste Resumo do Relatório Técnico é 31 de dezembro de 2021.

As premissas adotadas na elaboração deste relatório envolvem incertezas e riscos inerentes, e as informações contidas neste relatório não são garantia de desempenho futuro. Este relatório contém estimativas, previsões e declarações prospectivas, que podem ser identificadas usando palavras relacionadas a projeções futuras, como "antecipar", "acreditar", "pode", "esperar", "deve", "planejar", "pretender", "estimar", "será" e "potencial", entre outras. Essas estimativas, previsões e declarações envolvem vários riscos e incertezas conhecidos e desconhecidos. A Vale e suas PQs não podem garantir que tais declarações prospectivas sejam precisas. Os riscos e incertezas relacionados às nossas estimativas e previsões incluem, entre outros, fatores relacionados a (a) questões econômicas, políticas e sociais nos países onde operamos, incluindo fatores relacionados com a pandemia do coronavírus; (b) a economia global; (c) os mercados financeiros e de capitais; (d) as empresas de metais e mineração, que são cíclicas, e sua dependência da produção industrial global, que é também cíclica; (e) as regulamentações de mineração, ambiental e de saúde e segurança, incluindo as regulamentações relativas às mudanças climáticas; (f) incidentes ou acidentes operacionais, g) o alto grau de concorrência global nos mercados onde a Vale opera, (h) informações disponíveis no momento da preparação das declarações prospectivas e (j) dados fornecidos por fontes externas.

A Vale e seus PQs enfatizam que os resultados reais referentes aos recursos e reservas minerais da Vale podem diferir materialmente dos planos, objetivos, expectativas, estimativas e previsões aqui expressas. A Vale não assume qualquer obrigação de atualizar ou revisar publicamente qualquer declaração prospectiva, seja por causa de novas informações ou eventos futuros ou por qualquer outro motivo.

2.2. A empresa

A VALE é uma das maiores mineradoras do mundo, grande exportadora brasileira e uma das principais empresas privadas do Brasil. Com operações nos cinco continentes, a empresa possui uma base global e diversificada de acionistas e suas ações são negociadas nas principais bolsas de valores do mundo. Líder mundial na produção de minério de ferro, pelotas e níquel, a VALE também produz manganês, ferroligas, carvão, cobre, ouro, prata, cobalto e metais do grupo platina. Seus minérios são de alta qualidade e produzidos para atender de forma competitiva as necessidades dos clientes da indústria siderúrgica em todo o mundo. Para entregar produtos com rapidez, a empresa de mineração opera globalmente uma cadeia logística integrada e eficiente, que inclui ferrovias, terminais marítimos e portos, além de estações de transferência flutuantes e centros de distribuição.

A VALE tem ações negociadas na Bolsa de Valores de Nova York (NYSE). A Figura 2-1 mostra a localização dos segmentos de negócios da VALE no mundo.

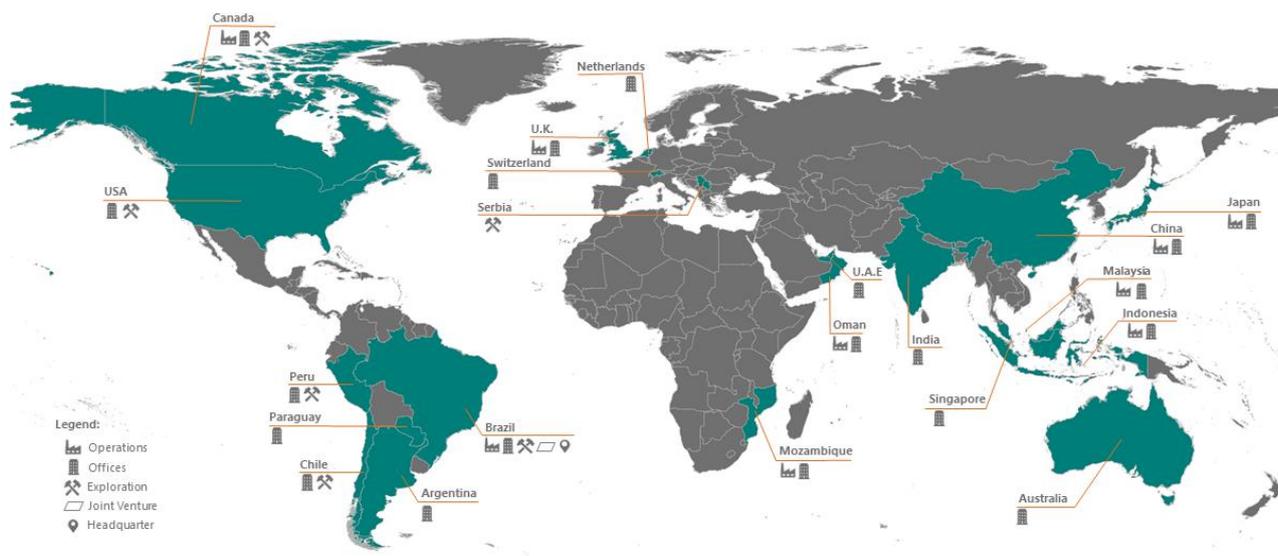


Figura 2-1 - Localização dos segmentos de negócios da VALE.

Legenda:

Operations
Offices
Exploration
Joint Venture
Headquarter

Operações
Escritórios
Exploração
Joint ventures
Sede

2.3. Visitas ao local

Profissionais qualificados (PQs) envolvidas na estimativa de recursos e reservas minerais na Serra Norte são profissionais com ampla experiência em suas áreas de atuação que realizam visitas repetidas aos respectivos locais descritos neste relatório. Devido à epidemia de COVID 19, essas visitas foram prejudicadas. A Tabela 2-1 mostra as últimas visitas e a programação futura.

Tabela 2-1 - Visitas ao local de PQs

PQ	Período de visita	Visitas programadas
Arnor Barbosa de Couto Junior (Reservas Minerais)	Março/2021	Primeiro semestre/2022
Guilherme Paiva da Silva (Reservas Minerais)	Março/2021	Primeiro semestre/2022
Carlos Eduardo Reinaldo Delgado (Geologia)	Março/2021	Primeiro semestre/2022
Evandro Machado da Cunha Filho (Recurso Mineral)	Novembro/2018	Primeiro semestre/2022

2.4. Profissionais Qualificados

Os seguintes funcionários da Vale atuam como Pessoas Qualificadas (QPs):

Profissional Qualificado (QPs)	Função	Capítulos de responsabilidade
Alessandro Resende, PQR CBRR	Engenheiro Especialista	1; 2; 3; 20; 21; 22; 23; 24 and 25
Arnor B. Couto Jr., PQR CBRR	Especialista Técnico em Reservas Minerais	1; 2; 4; 12; 13; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24 and 25
Carlos E. R. Delgado, PQR CBRR	Geólogo Master	1; 2; 5; 6; 7; 8; 9; 20; 21; 22; 23; 24 and 25
Evandro M. Cunha Filho, MAusIMM	Geólogo Especialista	1; 2; 5; 6; 8; 9; 11; 20; 21; 22; 23; 24 and 25
Guilherme Paiva da Silva, PQR CBRR	Engenheiro de Minas Especialista	1; 2; 12; 13; 15; 20; 21; 22; 23; 24 and 25
Helder Reis, PQR CBRR	Engenheiro Especialista de Reserva Mineral	1; 2; 12; 13; 15; 20; 21; 22; 23; 24 and 25
Hely Simões, PQR CBRR	Engenheiro Especialista de Desenvolvimento de Processos	1; 2; 10; 14; 20; 21; 22; 23; 24 and 25
Teófilo Costa, PQR CBRR	Especialista Técnico Geotécnico Sênior	1; 2; 7; 13; 20; 21; 22; 23; 24 and 25

Tabela 2-2 – Lista de PQs

2.5. Termos, unidades e abreviações

A VALE baseou todas as medições no sistema métrico e as exceções foram identificadas, principalmente ao listar os padrões em inglês e métrico. As moedas são geralmente baseadas em dólares americanos (USD), convertidos em real brasileiro por dólar americano. A taxa de câmbio utilizada para converter valores em reais brasileiros em dólares americanos é BRL: USD = 5,25 para 2022 e, em seguida, média de longo prazo de BRL 5,00: USD. A menos que indicado de outra forma, os dólares são dólares americanos e os pesos são em toneladas métricas de 1.000 quilogramas (2.204,62 libras). A Tabela 2-3 mostra as unidades usadas neste relatório. A Tabela 2-4 mostra as abreviações usadas neste relatório e a Tabela 2-5 mostra os símbolos químicos usados neste relatório.

Tabela 2-3 - Unidades de medida usadas neste relatório

Unidade	Abreviação
Dólar Americano	USD
GigaAnos	Ga/Gy
Milhões de anos	Ma
Hectare	ha
Índice de Trabalho do Moinho de Bolas (métrico)	kWh/t
Reais Brasileiros	R\$ ou BRL
Centígrado	°X
Centímetro cúbico	cm ³
Centímetro	cm
Metro cúbico	m ³
Metros cúbicos por segundo	m ³ /s
Dia	d
Tonelada de peso morto (tonelada imperial - longa)	Dwt
Tonelada métrica seca	dmt
Grama	g
Grama/litro	g/L
Grama/tonelada	g/t
Hora	h
Horas por ano	h/ano
Quilograma	kg
Quilograma por tonelada	kg/t
Quilômetro	km
Quilopascal	kPa
Quilovolt	kV
Quilovolt amp	kVA
Quilowatt	kW
Quilowatt hora	kWh
Litro	T
Litro por segundo	L/s
Megawatt	MW
Metro	m
Metro por hora	m/h
Metro por segundo	m/s
Tonelada métrica	t
Toneladas métricas por hora	t/h
Toneladas métricas por dia	t/d
Toneladas métricas por ano	t/a
Minuto	min
Mícron	Mm
Miligrama	mg
Miligrama por litro	mg/L

Milímetro	mm
Milhões	M
Milhões de toneladas curtas	MT
Milhões de toneladas curtas por ano	MT/a
Partes por bilhão	ppb
Partes por milhão	ppm
Porcentagem	%
Segundo	s
Tonelada curta	T
Metros quadrados	m ²
Toneladas por dia	t/d
Onça Troy	Oz.
Tonelada métrica úmida	wmt
Índice de trabalho	WI
Ano	ano

Tabela 2-4 - Lista de abreviações usadas neste relatório

Abreviação	Acrônimo
ANM	Agência Nacional de Mineração
BRBF	Brazilian Blend Fines
BSM	Britador Semimóvel
CAPEX	Custos de Capital
CD	Ensaio de Cisalhamento Triaxial Consolidado Drenado
CDM	Centro de Desenvolvimento Mineral
CNM	Cálculo Normativo Mineralógico
CE	Canga Estrutural
CFEM	Compensação Financeira para a Exploração de Recursos Minerais
CFR	Custo e Frete
CKS	Província Mineral de Carajás
CLI	Classificação Interpretada
CLM	Chave de Classificação Matemática
CLV	Variável de Classificação Visual
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CPT	Centro de Pesquisa Tecnológica
CQ	Canga Química
CRIRSCO	Comitê para Reporte Padrão Internacional de Reservas Minerais
CS	Contribuição Social
CU	Ensaio de Cisalhamento Triaxial Consolidado Não Drenado
DCF	Fluxo de Caixa Descontado
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EBIT	Lucros Antes de Juros e Impostos

EFC	Estrada de Ferro Carajás
EL	Licença Ambiental
ELM	Método do Equilíbrio Limite
WTP	Estação de Tratamento de Água
FAI	Valor do Investimento
FEGL	Distribuição de Ferro Global
FLONACA	Floresta Nacional de Carajás
FMN	Ferro Manganêsífero
FOB	Livre a Bordo
FoS	Fator de segurança
GDMS	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Geológico
GM	Grupamento Mineiro
HC	Hematita compacta
HF	Hematita friável
HMN	Hematita manganêsífera
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICM	Modelos de Correlação Intrínseca
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
ICMM	Conselho Internacional de Mineração e Metais
IK	Krigagem Indicadora
IOCJ	Minério de Ferro de Carajás
IR	Índice de Risco
IR	Imposto de Renda
TIR	Taxa Interna de Retorno
JCS	Resistência à Compressão da Junta
JP	Jaspilito
JRC	Coefficiente de Rugosidade da Junta
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LOI	Perda ao Fogo
LP	Licença Prévia
LT	Longo Prazo
MD	Máfica Decomposta
Interface	Máfica sã
MSD	Máfica semidecomposta
NN	Vizinho Mais Próximo
VPL	Valor Presente Líquido
nRMS	Raiz Quadrada Média Normalizada
NYSE	Bolsa de Valores de Nova York
OK	Krigagem Ordinária

OL	Licença de Operação
OPEX	Despesas Operacionais
PAE	Plano de Aprroveitamento Econômico
PF	Pellet Feed
PI	Partículas Inaláveis
PT	Partículas Suspensas
QA/QC	Garantia de Qualidade/Controle de Qualidade
PQs	Profissionais qualificados
RAL	Relatório Anual de Lavra
RFP	Relatório Final de Pesquisa
ROL	Laminado
ROM	Minério Bruto – Run on Mine
RPM	Runge Pincock Minarco
RQD	Designação de Qualidade da Rocha
SEC	Comissão de Valores Mobiliários e Câmbio
SIN	Sistema Interconectado Nacional
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
TFRM	Taxa de Controle, Monitoramento e Fiscalização das Atividades de Pesquisa, Lavra, Exploração e Aproveitamento de Recursos Minerários
TMPM	Terminal Marítimo Ponta da Madeira
TTG	Tonalito-trondhjemito-granodiorito
UC	Unidades de Conservação
UCS	Resistência de Compressão Não Confinada
USS	United States Steel
VALE	Antigamente conhecida como CVRD
VIU	Valor em uso
WSA	World Steel Association
YoY	Ano a Ano

Tabela 2-5 - Lista de símbolos químicos usados neste relatório

Elemento	Símbolo
Alumínio	Al
Ferro	Fe
Magnésio	Mg
Manganês	Mn
Oxigênio	O2
Fósforo	P
Potássio	K
Cálcio	Ca
Sílica	Si
Titânio	Ti
Potássio	K

3. Descrição da propriedade

3.1. Código de mineração brasileiro

De acordo com as leis brasileiras, o Governo Federal detém todos os recursos minerais. Nos termos do Artigo 176 da Constituição Brasileira, todos os depósitos minerais pertencem ao Governo Federal, quer os depósitos estejam ou não em produção ativa. Os direitos minerários são distintos dos direitos de superfície.

A mineração é regulamentada pelo Decreto-Lei 227 de 1967 (o Código de Mineração), os Regulamentos de Mineração que entraram em vigor em dezembro de 2017 e outros regulamentos emitidos pela Agência Nacional de Mineração (ANM), anteriormente conhecida como Departamento Nacional de Produção de Mineração (DNPM), que controla as atividades de mineração no Brasil.

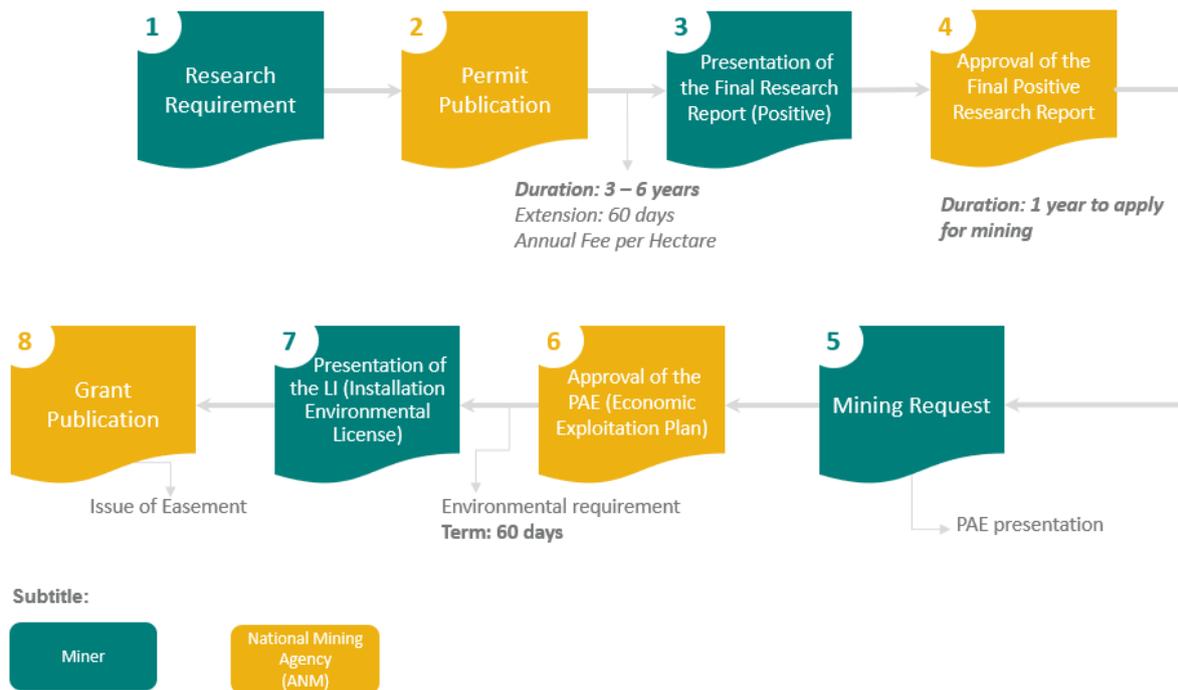
No que diz respeito aos regimes de autorização e concessão de lavra, o objetivo é obter o documento de propriedade de mineração que permite a exploração do recurso mineral, que neste caso, é uma regra administrativa concedida pelo Ministro de Minas e Energia, comumente conhecido como Concessão de Lavra. Há um título intermediário, uma permissão de exploração concedida pelo Diretor Geral da ANM, que autoriza a parte interessada a explorar determinadas substâncias minerais, a fim de definir sua quantidade, qualidade e distribuição espacial.

O ciclo de mineração começa com o Pedido de Autorização de Exploração, seguido pela publicação da Autorização de Exploração (*Alvará de Pesquisa*) no Diário Oficial da União – DOU. O seu detentor está autorizado a realizar o trabalho de pesquisa no prazo de 3 a 6 anos, cujo objetivo é definir um depósito, ou seja, qualificar, quantificar e localizar espacialmente a substância mineral de interesse.

Ao final da fase de exploração, o detentor deve apresentar um Relatório Técnico de Exploração (*Relatório Final de Pesquisa*) à ANM, de acordo com os resultados apresentados. Após análise pela ANM, e considerando a aprovação do documento, a empresa de mineração terá 1 ano para solicitar a concessão de lavra. Este pedido baseia-se na apresentação de um Plano de Exploração Econômica (*Plano de Aproveitamento Econômico* ou PAE), que deve ser preparado por um profissional legalmente qualificado.

Uma vez apresentado o PAE, a ANM exigirá a apresentação da licença de instalação (LI – Licença de Instalação), concedida por uma agência de licenciamento ambiental, e a empresa de mineração deve realizar a devida diligência com esta agência a cada 180 dias, para comprovar o progresso no processo de licenciamento ambiental à ANM.

Após obter a licença ambiental (LI), a empresa de mineração poderá obter a Concessão de Lavra no Diário Oficial da União – DOU. A Figura 3-1 mostra o fluxograma do processo de licenciamento mineral brasileiro.



Legenda:

- 1 - Requerimento de Pesquisa
- 2 – Publicação da Autorização
- 3 - Apresentação do Relatório Final de Pesquisa (Positivo)
- 4 - Aprovação do Relatório Final de Pesquisa Positiva

- 1 - Research Requirement
- 2 - Permit Publication
- 3 - Presentation of the Final Research Report (Positive)
- 4 - Approval of the Final Positive Research Report

Duração: 3-6 anos
 Extensão: 60 dias
 Taxa Anual por Hectare

Duration: 3 6 years
 Extension: 60 days
 Annual Fee per Hectare

Duração: 1 ano para candidatar-se à mineração

Duration: 1 year to apply for mining

Publicação da Concessão
 Apresentação da LI (Licença Ambiental de Instalação)
 Aprovação do PA (Plano de Exploração Econômica)
 Requerimento de Lavra

Grant Publication
 Presentation of the LI (Installation Environmental License)
 Approval of the PA (Economic Exploitation Plan)
 Mining Request

Emissão de Servidão

Issue of Easement

Requerimento ambiental
 Prazo: 60 dias

Environmental requirement
 Term: 60 days

Apresentação da PA

PA presentation

Subtítulo:
 Mineiro
 Agência Nacional de Mineração (ANM)

Subtitle:
 Miner
 National Mining Agency (ANM)

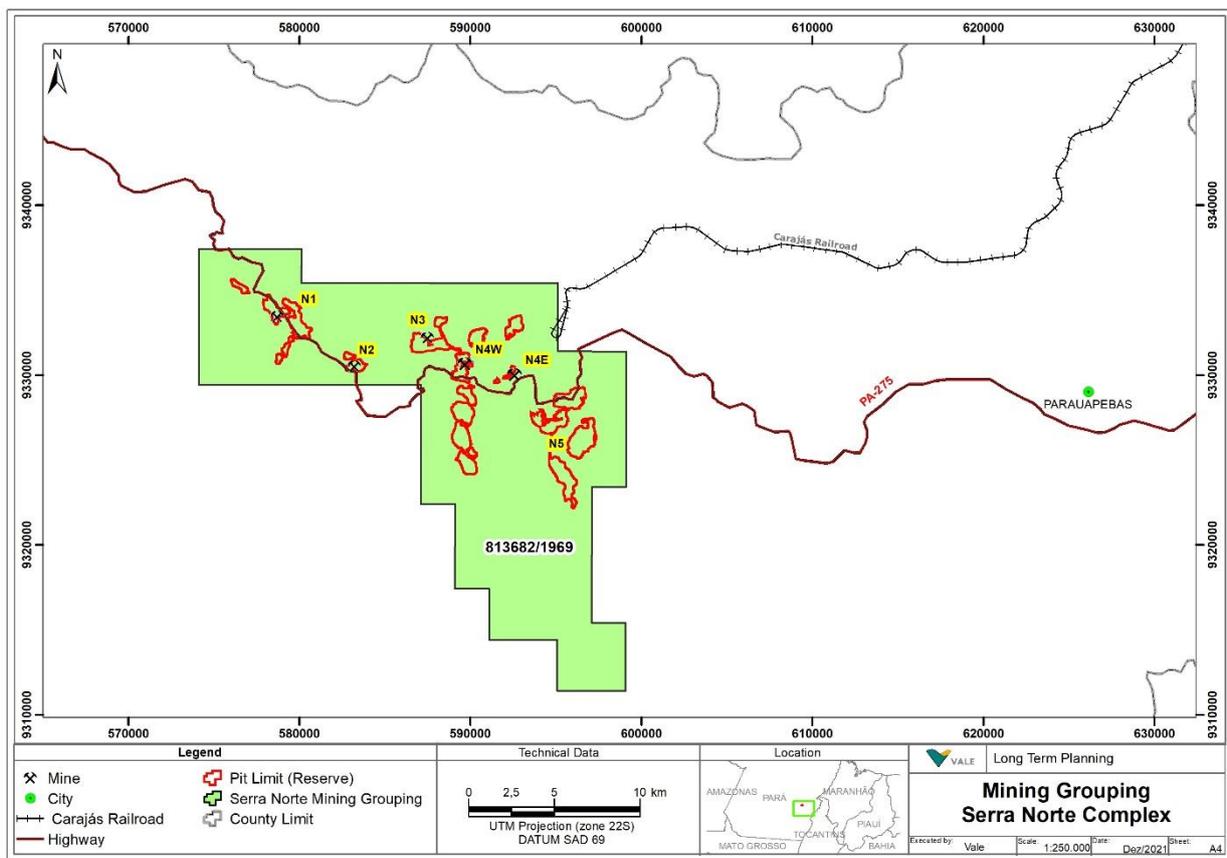
Figura 3-1: Fluxograma do processo de licença

As atividades de mineração devem começar em até seis meses a partir da concessão de lavra. Os relatórios anuais de produção devem ser arquivados. Assumindo que todas as outras condições sejam cumpridas, as concessões de lavra permanecem válidas até que o depósito se esgote.

A empresa de mineração pode realizar atividades de mineração após a emissão da licença de operação ambiental apropriada (LO - Licença de Operação). As operações de lavra devem estar de acordo com o Plano de Aproveitamento Econômico aprovado pela ANM. Se minerais adicionais forem descobertos, a ANM deve ser notificada da descoberta, e a concessão de lavra deve ser alterada para incluir a nova lista de minerais antes que esses minerais possam ser produzidos e vendidos comercialmente.

3.2. Direito Minerário

Na Serra Norte, o direito minerário foi agrupado em uma licença denominada Grupamento Mineiro ou GM, que é o agrupamento de concessões, permitindo o processamento e a aprovação de direitos minerários para um grupo de concessões em um único processo. A Figura 3-2 apresenta o direito minerário de Serra Norte (813.684/1969), que faz parte de um Grupamento Mineiro (852.145/1976) entre outras operações, incluindo Serra Sul e Serra Leste. A Tabela 3-1 mostra mais informações sobre a concessão de lavra de Serra Norte.



Legenda:

Legenda

Mina

Cidade

Estrada de Ferro Carajás

Estrada

Limite da Cava (Reserva)

Grupamento Mineiro Serra Norte

Limite do Município

Dados Técnicos

Projeção UTM (zona 22S)

DATUM SAD 69

Legend

Mine

City

Carajás Railroad

Highway

Pit Limit (Reserve)

Serra Norte Mining Grouping

County Limit

Technical Data

UTM Projection (zone 22S)

DATUM SAD 69

Localização	Location
Planejamento de Longo Prazo	Long Term Planning
Grupamento Mineiro Complexo Serra Norte	Mining Grouping Serra Norte Complex
Executado por:	Executed by:
Escala:	Scale:
Data: Dez/2021	Date: Dez/2021
Folha:	Sheet:

Figura 3-2 - Concessão de Mineração Serra Norte

Tabela 3-1 - Direitos de Mineração Serra Norte formando o Agrupamento de Concessão

Processo ANM	Cidade	Área (ha)	Título	Número	Data de emissão	Elemento	Mina
813.682/1969	Parauapebas	30.000	Direito de mineração	74.508	06/09/1974	Ferro	Serra Norte

Atualmente, o Complexo Serra Norte possui quatro servidões de lavra, como segue.

- Servidão 1, com uma área de 4.052,46 ha, cujo relatório técnico foi aprovado em 13/07/88;
- Servidão 2, com uma área de 8.527,54 ha, cujo relatório técnico foi aprovado em 01/12/88;
- Servidão 3, com uma área de 15.565,33 ha, cuja aprovação do relatório técnico foi solicitada ao mesmo tempo em que o PAE foi registrado em 30/01/2009 e reiterado em 03/07/2013;
- Servidão 4, com uma área de 10.031,52 ha, foi solicitada em 17/02/2017, sendo o PAE aprovado em 19/04/2021.

Essas 4 servidões são contíguas e formam uma forma única que engloba todas as instalações industriais atuais e futuras necessárias para a vida da mina Serra Norte.

A Vale é obrigada a pagar uma taxa federal mensal conhecida como Compensação Financeira para a Exploração de Recursos Minerários ("CFEM") sobre as vendas de minério de ferro, à taxa atual de 3,5%. O estado do Pará também impõe um imposto sobre a produção mineral (Taxas de Controle, Monitoramento e Fiscalização das Atividades de Pesquisa, Lavra, Exploração e Aproveitamento de Recursos Minerários - "TFRM"), que é atualmente calculado a uma taxa de R\$ 4,1297 por tonelada métrica de minerais produzidos ou transferidos do estado.

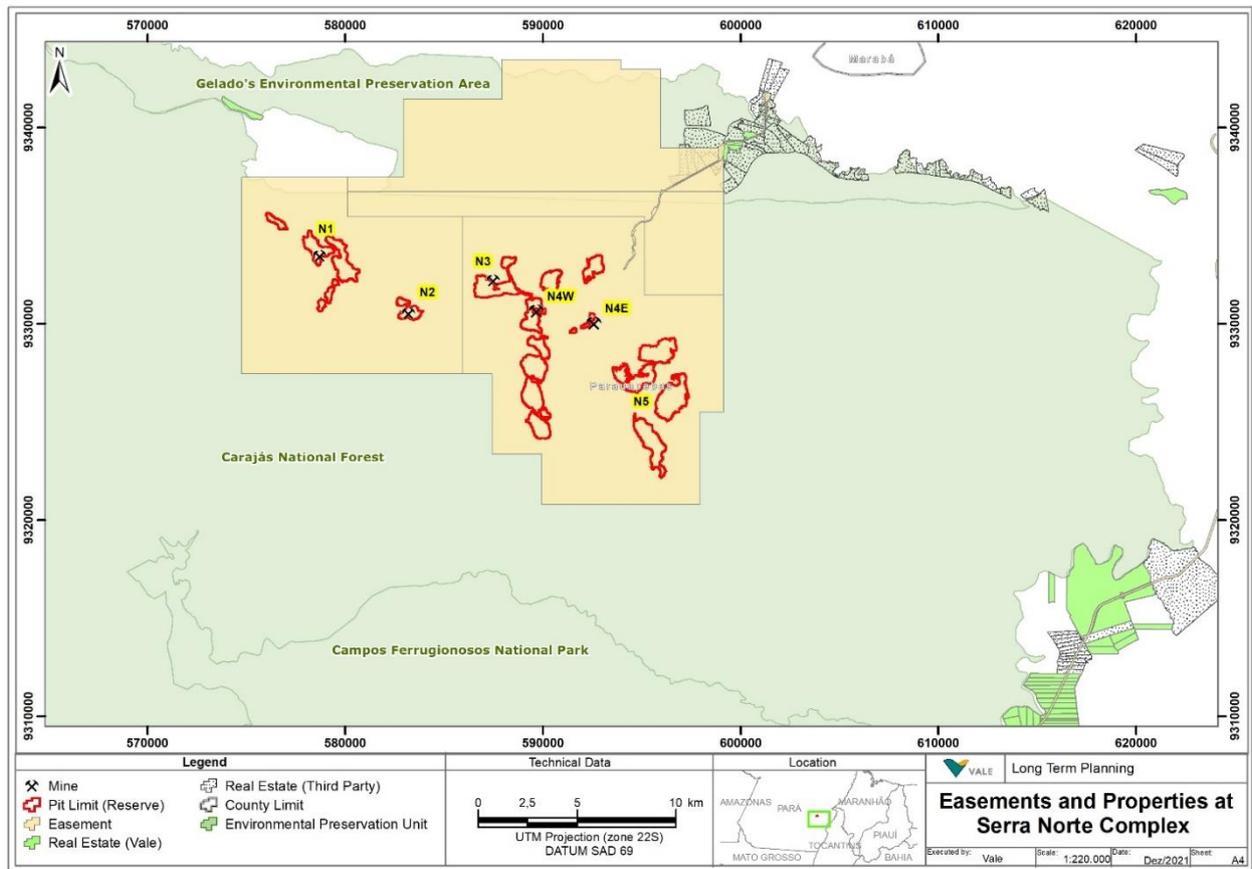
Um relatório anual (RAL - Sigla brasileira) deve ser apresentado à ANM, detalhando a produção do ano. Esta obrigação de relatório foi cumprida a cada ano desde a concessão.

3.3. Direitos de superfície e Servidão

De acordo com a Lei Geral de Mineração e legislação relacionada, os direitos à superfície são independentes dos direitos minerais. A lei exige que o detentor de uma concessão mineral chegue a um acordo com o proprietário antes de iniciar as atividades de mineração relevantes (ou seja, exploração, aproveitamento, etc.) ou concluir o procedimento administrativo de servidão, seguindo a regulamentação aplicável. A propriedade de superfície é adquirida por meio de:

- A transferência de propriedade por acordo das partes (título derivado);
- Prescrição aquisitiva do domínio (título original);
- Direitos temporários de uso e/ou gozo de poderes derivados de um direito de propriedade de superfície podem ser obtidos por meio de usufruto (um direito de usar temporariamente e derivar receita) e servidões.

Conforme indicado pela Vale, a Serra Norte está localizada dentro da Floresta Nacional de Carajás (FLONACA), que pertence ao Governo Federal e não há interferências das operações com propriedades de terceiros, como mostrado na Figura 3-3.



Legenda:

- Mina
- Limite da Cava (Reserva)
- Servidão
- Imóveis (Vale)
- Imóveis (Terceiros)
- Limite de Município
- Unidade de Preservação Ambiental

- Mine
- Pit Limit (Reserve)
- Easement
- Real Estate (Vale)
- Real Estate (Third Party)
- County Limit
- Environmental Preservation Unit

Dados Técnicos
 Projeção UTM (zona 22S) DATUM SAD 69

Technical Data
 UTM Projection (zone 22S) DATUM SAD 69

Localização

Location

Planejamento de Longo Prazo
 Servidões e Propriedades no Complexo Serra Norte
 Executado por:
 Escala:
 Data: Dez/2021
 Folha:

Long Term Planning
 Easements and Properties at Serra Norte Complex
 Executed by:
 Scale:
 Date: Dez/2021
 Sheet:

Figura 3-3 - Servidões e propriedades na Serra Norte.

4. Acessibilidade, clima, recursos locais, infraestrutura e fisiografia

4.1. Acessibilidade

O acesso a Parauapebas é feito por meio de voos regulares entre Carajás e as cidades de Marabá, Belém, Belo Horizonte e Brasília, além de estradas pavimentadas (PA-275, PA-150 e PA-70) e uma ferrovia que liga Carajás à cidade de São Luiz (estado do Maranhão).

Para acessar as Minas da Serra Norte Carajás partindo de Marabá, pegue a rodovia BR-230 leste e aproximadamente 1 km no cruzamento com a BR-155, siga para o sul em direção ao município de Eldorado dos Carajás, a aproximadamente 95 km de distância. De lá, pegue a saída para PA-275, siga 230 km a oeste em direção a Parauapebas, passando pela entrada da Floresta Nacional de Carajás, e continuando mais 30 km a leste para chegar à portaria da Mina Serra Norte Carajás.

4.2. Clima

O clima da região é tropical úmido de monção, com primavera seca, clima quente e temperaturas médias elevadas. Os meses mais frios correspondem ao período de janeiro a março (médias de 18°C a 21°C), coincidindo com a pluviosidade mais alta e a maior presença de nebulosidade. De novembro a abril, chove 80% do total anual. A estação seca, que vai de maio a outubro, com o trimestre mais seco (junho, julho e agosto), tem médias mensais de apenas 24 mm, pouca chuva para os padrões amazônicos. A precipitação média anual da região varia de 1.500 a 1.900 mm e a temperatura média anual está entre 23,5 e 25,5°C, com a temperatura média máxima atingindo 32,5°C de junho a agosto, a mínima nunca inferior a 18°C.

A região é úmida, com umidade média variando entre 70 e 85%. Nos meses mais secos, de junho a agosto, a umidade é ligeiramente reduzida, atingindo níveis mínimos em torno de 50% e média de cerca de 70%. Durante os meses chuvosos, de outubro a maio, a média máxima pode ultrapassar 95%. A Mina opera o ano todo.

4.3. Recursos locais

Vários serviços, incluindo acomodações temporárias e permanentes, estão disponíveis em Parauapebas (população 213.576, estimada em 2020), localizada a aproximadamente 50 km a leste do Complexo da Mina. Uma maior gama de serviços gerais está disponível na capital do estado, Belém, localizada a aproximadamente 770 km a nordeste.

4.4. Infraestrutura

O complexo operacional da Serra Norte (Carajás) é totalmente abastecido pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), o sistema de produção e transmissão de eletricidade brasileiro e está conectado à Rede Básica (230kV). O sistema de energia é fornecido por duas linhas de transmissão da Subestação Carajás de propriedade da Eletronorte (Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.), responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia no estado do Pará.

O sistema de distribuição interna é realizado por meio de redes elétricas da Vale de 34,5kV. O consumo em 2020 foi de cerca de 468.794,24 MWh, 68,87% dos quais alimentaram as plantas de processamento mineral, 27,57% foram distribuídos para as minas N4/N5 e os 3,56% restantes foram consumidos pelo Centro Urbano e outras estruturas de apoio.

O projeto inclui infraestrutura completa de oficina de manutenção (três unidades localizadas nas minas N5, N4W e Central) equipada com baias para máquinas móveis, usinagem, oficina de manutenção de subconjuntos, oficina elétrica, oficina eletrônica, armazém e ferramentas.

Todo o controle de qualidade do minério é realizado utilizando as estruturas do Laboratório da Mina de Ferro de Carajás, onde são realizados testes físicos e ensaios químicos de toda a cadeia produtiva.

Os escritórios de administração abrigam a Vale S.A. e suas contratadas. Eles são compostos por escritórios para a direção, gestão, coordenação, técnicos, reuniões, arquivos, recepção e banheiros, que atendem toda a equipe administrativa.

Um refeitório (sala de refeições) atende toda a equipe, tanto interna quanto contratada, para almoço, jantar e lanches. Sua operação é terceirizada pela Vale como a adotada em outras unidades operacionais da empresa.

A clínica possui um pequeno escritório para atendimento de primeiros socorros e um banheiro. A clínica está equipada para atendimento de primeiros socorros, enquanto os casos mais graves são encaminhados ao hospital no centro urbano. Os pacientes são transportados por ambulância, que fica estacionada na clínica com um motorista de prontidão permanente.

Parte da equipe de funcionários da empresa reside no centro urbano de Carajás, e parte, na cidade de Parauapebas, sem necessidade de construção de novos alojamentos na área industrial.

4.5. Fisiografia

O relevo físico da área é composto por três geografias: platôs formados sobre rochas dos jaspilites e tipos de basalto, Vertentes (áreas de encostas montanhosas) e Depressões Fluviais (fundos do vale). Os platôs formam elevações de cerca de 720 metros e são separados por vales onde os cursos d'água estão localizados. Quando os platôs estão situados sobre rochas de basalto, seus topos são mais planos. Estas são porções de terra muito estáveis devido às baixas declividades, à existência de rocha resistente e permeável, além de solos permeáveis (latossolos) e densa cobertura vegetal (florestas). Por outro lado, quando os platôs estão situados sobre rochas do tipo jaspilito, são ondulantes e podem atingir até 800 metros de elevação.

As depressões fluviais constituem as áreas localizadas abaixo de 400 metros e correspondem à parte inferior dos taludes e ao fundo dos vales dos "igarapés" e córregos que fluem para a área. Eles geralmente ocorrem em basaltos, cobertos por florestas em solos espessos. Nas porções mais baixas e planas, ocorrem solos úmidos (gleissolos) em áreas pantanosas. Depressões também podem ocorrer em arenitos, cobertos por florestas e solos menos profundos.

O complexo Carajás está localizado no domínio da sub-bacia do Rio Parauapebas, um afluente do Rio Itacaiúnas que deságua no Rio Tocantins, na cidade de Marabá.

A nascente do rio Parauapebas fica na Serra Arqueada e é formada pela junção dos córregos Caracol e Onça. Ela flui para o norte, recebendo os seguintes afluentes: Córrego Goiaba, rio Sossego, rio Taboca, rio Jacaré e rio Gelado (também conhecido como Cigano ou Mombuca), na margem esquerda; e os rios Plaquê e Verde, o riacho Ilha do Coco e os rios Novo e Caracol, na margem direita.

A área de projeto está localizada nas bacias dos rios Gelado, Geladinho, Taboca e Jacaré. As nascentes desses cursos d'água estão localizadas nas partes altas dos platôs da Serra dos Carajás.

O fluxo de água subterrânea ocorre a partir da infiltração de água da chuva nos platôs em direção ao fundo dos vales onde os cursos d'água estão localizados. Em áreas não exploradas, o nível freático fica, em média, entre 10 e 70 metros abaixo da superfície do solo.

Desconsiderando os locais onde os rios desapareceram com o aprofundamento da lavra, estudos indicam que a redução do nível de água nas minas não causou desaparecimento de grandes nascentes, pois as nascentes estão em altitudes mais baixas, no fundo dos vales e taludes, e apenas seu fluxo foi afetado.

Em relação ao meio biótico, a unidade Serra Norte está localizada no bioma da Floresta Amazônica, em uma região de ocupação socioeconômica relativamente recente. Serra Norte faz parte de uma Unidade de Conservação gerenciada e protegida pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), com apoio da Vale. A vegetação varia entre savana (vegetação típica de formações ferríferas - onde há minério de ferro presente) e a Floresta Amazônica. Devido à heterogeneidade e ao alto grau de conservação dos ambientes naturais ainda existentes, esta

unidade de conservação é um valioso refúgio para a fauna e é muito importante para a conservação da biodiversidade no estado do Pará.

Áreas protegidas próximas aos Complexos de Mineração incluem as Florestas Nacionais de Tapirapé-Aquiri, Itacaiúnas e Carajás, o Parque Nacional Campos Ferruginosos, a Reserva Biológica do Tapirapé, a Terra Indígena Xikrin do Rio Cateté e a Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado. Essas áreas somam cerca de 1.2 milhão de hectares relativamente bem preservados, em contraste com as áreas antropizadas do entorno.

5. História

5.1. Exploração e história de desenvolvimento

O primeiro levantamento geológico na Serra dos Carajás foi realizado em 1922 por Avelino Ignácio de Oliveira, que revelou a ocorrência de galena em São Félix do Xingu e material carbonáceo no rio Fresco. As primeiras citações envolvendo formações ferríferas foram feitas em 1933, quando o engenheiro Luiz Flores de Moraes Rego se referiu a "colinas de topo plano onde campos gerais se encontram" na região alta do Rio Itacaiúnas. Em 1951/1952, o geógrafo Luiz Castro Soares realizou um levantamento aéreo da fitofisionomia da região, onde ele observou a existência de formações não florestais com grandes clareiras e lagos.

A primeira publicação de Carajás pode ser vista na fotografia aérea das jazidas C e D da Serra Sul em Carta do Brasil ao Milionésimo, publicada pelo IBGE em 1960, sete anos antes da descoberta dos depósitos (Magalhães, 1960). Nesta publicação, as áreas de campos elevados foram erroneamente classificadas pelo autor como "platôs calcários com lagos elevados no sul do Pará". Como visto mais adiante, correspondem a platôs de ferro e as lagoas preenchem sumidouros sobre cangas.

Em 1967, foi lançado o mapeamento pioneiro "Geologia Estratigráfica, Estrutural e Econômica da Área do Projeto Araguaia" – DNPM/PROSPEC (1954 a 1966). Neste trabalho, foi realizado um levantamento aéro-fotogramétrico completo, mas as ocorrências de minério de ferro não foram identificadas devido à falta de trabalho de campo. Devido à presença de lagos, as clareiras foram interpretadas como relevo cárstico. No mesmo ano, a United States Steel (USS) criou o Programa Brasileiro de Exploração – BEP, para explorar manganês, uma vez que é estratégico para a indústria siderúrgica e para a economia americana durante a guerra fria. No final de maio de 1967, foram feitos voos de reconhecimento entre os rios Tocantins e Tapajós.

Em julho de 1967, a equipe do Programa Brasileiro de Exploração recebeu as fotos aéreas do Projeto Araguaia e verificou a existência de várias grandes clareiras na floresta, como as vistas nos voos de reconhecimento realizados em maio de 1967.

Em 31 de julho de 1967, o primeiro helicóptero pousou na clareira da canga de hematita de Serra Arqueada. Em agosto, foi realizado um sobrevoo, em baixa altitude, com um avião monomotor, nas clareiras da Serra Norte, verificando a grande semelhança com a cobertura de canga de Serra Arqueada e um levantamento aeromagnético em Sereno, Serra Leste, Serra Norte e Serra Sul. Também foram realizados levantamentos preliminares de campo da Serra Norte (N1, N2, N3, N4, N5) e Serra Sul. Em setembro de 1967, o potencial de 2 a 35 bilhões de toneladas de minério de ferro foi comunicado à United States Steel em Pittsburgh (EUA).

Entre setembro e outubro de 1967, os pedidos de exploração foram preparados e protocolados no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), abrangendo um total de 160.000 hectares de Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e São Félix.

Em abril de 1970, a Amazônia Mineração S.A. foi criada, constituída 51% pela VALE (na época Companhia Vale do Rio Doce – CVRD) e 49% pela United States Steel. A avaliação dos depósitos de ferro de Carajás começou em 1970, realizada com apoio aéreo, devido à falta de acesso por estrada. Entre 1970 e 1972, foi realizado um trabalho intensivo de exploração nas ocorrências identificadas. Os geólogos da CVRD, liderados pelo engenheiro Alúzio Licínio de Barbosa, juntamente com a equipe da United States Steel, foram responsáveis pela estimativa dos potenciais de minério de ferro na Serra dos Carajás. Foram determinados recursos totais de cerca de 18 bilhões de toneladas de minério de ferro, com teor de Fe de 66%, concentrados em quatro depósitos principais: N4, N5, N1 (Serra Norte) e S11 (Serra Sul).

Em 1977, a VALE (CVRD) adquiriu a participação acionária da United States Steel, sendo a única responsável pela realização do projeto. Em 1979, a construção do complexo do Projeto Ferro Carajás iniciou, integrando a mina, a ferrovia e o porto. Em fevereiro de 1985, a ferrovia São Luiz – Carajás foi concluída. A produção de minério de ferro começou em 1985, o depósito de N4E e o depósito de N4W entraram em operação em 1994. Operações na Serra Sul começaram em 2016.

5.2. Histórico de produção

A Tabela 5-1 mostra um resumo do histórico de produção do Complexo Serra Norte.

Tabela 5-1 - Produção anterior das minas da Serra Norte.

Ano	Minério (t)	Estéril (t)	Total (t)	Produto (t)
2016	159.919.775	62.535.175	222.454.950	143.560.547
2017	141.690.807	63.523.090	205.213.897	142.683.237
2018	134.443.397	73.349.550	207.792.947	131.536.360
2019	117.010.321	101.548.705	218.559.026	115.277.540
2020	110.185.273	100.758.725	210.943.999	109.123.167
2021	111.857.464	109.042.539	220.900.002	109.268.321

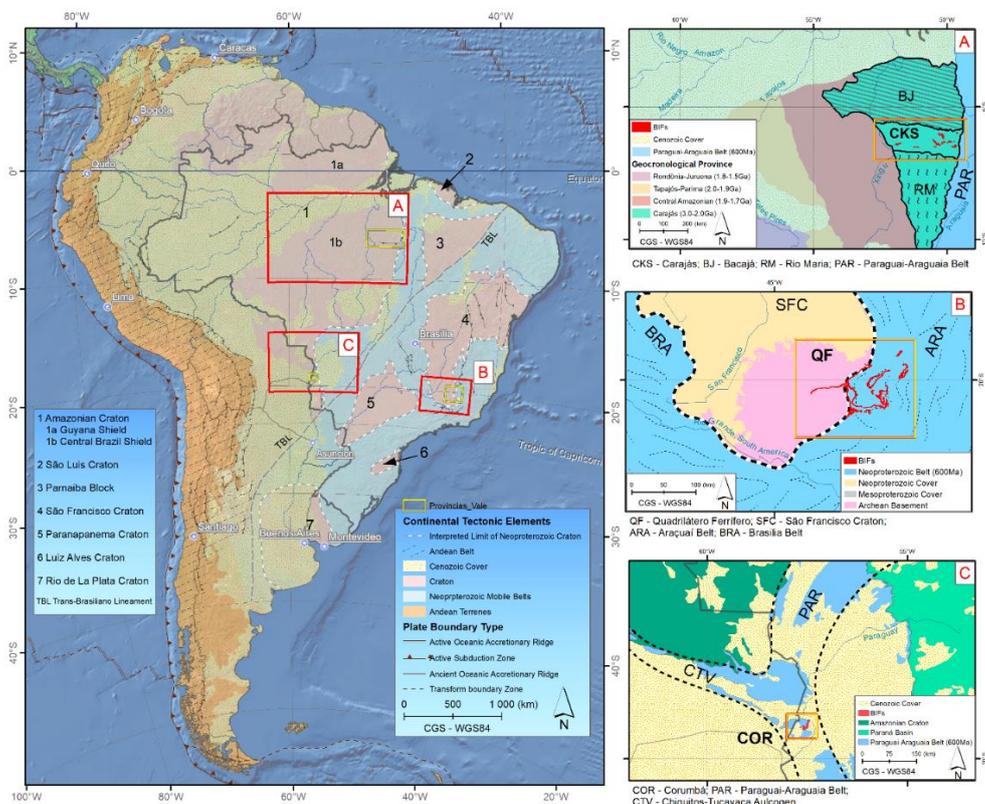
6. Cenário geológico, mineralização e depósito

6.1. Geologia regional

A Província Mineral de Carajás (CKS) compreende uma área de aproximadamente 30.000 km² localizada no sudeste do estado do Pará e se destaca como a principal província polimetálica em operação do país, abrigando depósitos de classe mundial e minas importantes de Fe, Cu, Au, Mn e Ni.

A província ocupa a porção oriental do Cratón Amazônico (Figura 6-1) e corresponde ao núcleo mais antigo, da idade Arqueana, limitado pela Província Geocronológica da Amazônia Central (1,9-1,7 Ga) a oeste e pelo cinturão móvel Paraguai-Araguaia (700-450 Ma) a leste (Santos, 2000 e Santos, 2003). Embora as classificações do Cratón Amazônico sejam motivo de debate na literatura científica, a subdivisão de sua porção sudeste é bem aceita e justificada, tanto do ponto de vista geocronológico quanto da orientação de suas principais estruturas. Nesse sentido, os domínios Rio Maria, da idade Mesoarqueana, com orientação N-S preferencial, Carajás (Neoarqueana), com orientação WNW-ESE e Bacajá (Paleoproterozoica), com orientação NW-SE, são reconhecidos. A evolução tectônica desta porção do cratón não é clara, e os limites entre esses domínios são difusos e geralmente transicionais.

A estrutura geológica da porção sudeste do Cratón Amazônico é amplamente discutida na literatura científica, com diferentes propostas de evolução, subdivisão e nomenclatura. De acordo com a definição de Tassinari e Macambira (2004), adotada aqui, a Província Mineral de Carajás se enquadraria na Província Geocronológica de Maroni-Itacaiúnas, limitada pela Província da Amazônia Central a oeste, o domínio Bacajá ao norte e o Cinturão Araguaia a leste. Esta província geocronológica seria subdividida no domínio Mesoarqueano do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria (Dall'Agnol et al., 1987; Dall'Agnol et al., 1997, 2006; Althoff et al., 2000) e o domínio Neoarqueano de Carajás (Araújo e Maia, 1991; Vasquez et al., 2008).



Legenda:

Cratón Amazônico
1a Escudo da Guiana

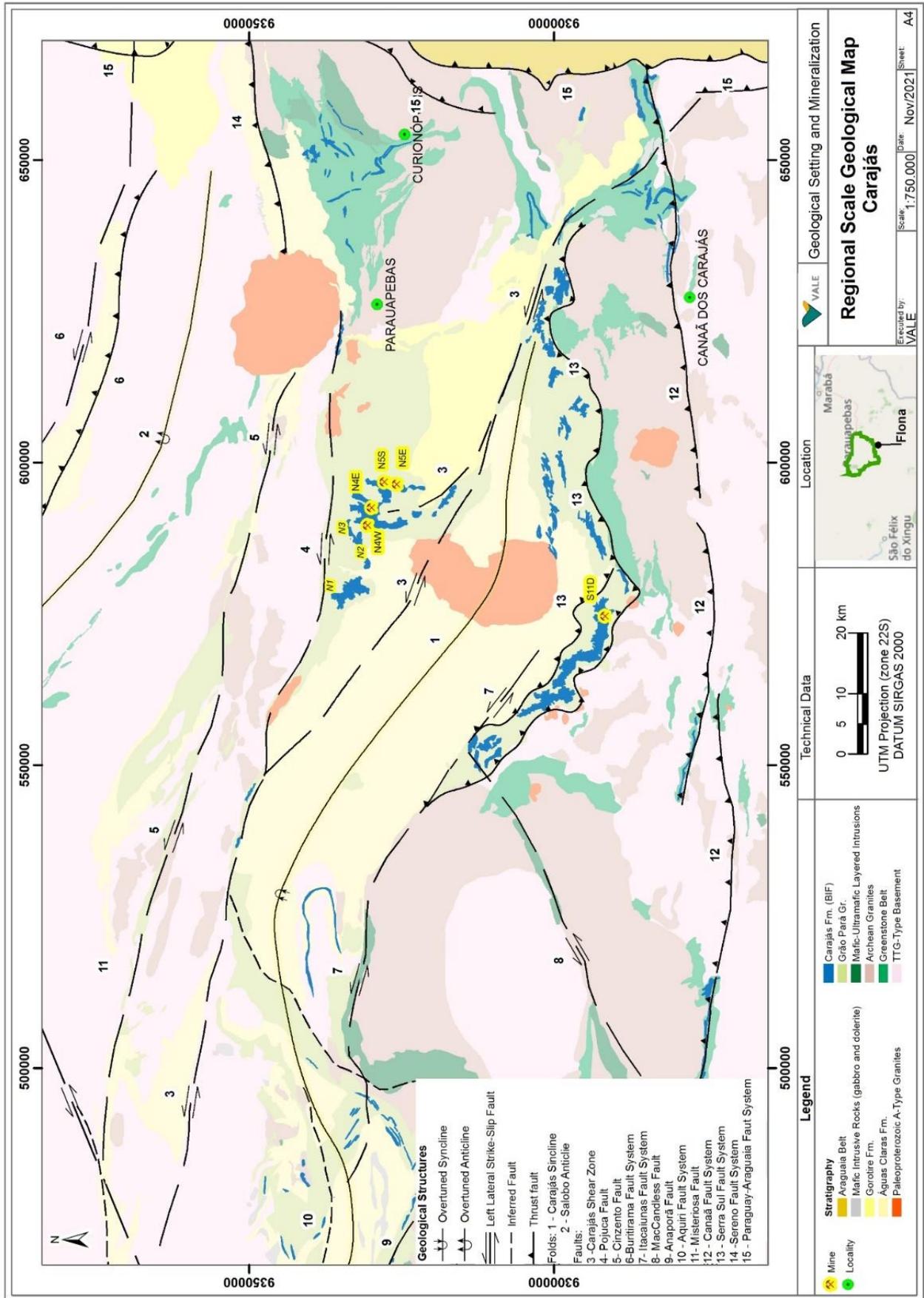
Amazonian Craton
1a Guyana Shield

1b Escudo Central do Brasil	1b Central Brazil Shield
2 Cratón de São Luís	2 São Luis Craton
3 Bloco Parnaíba	3 Parnaiba Block
4 Cratón de São Francisco	4 São Francisco Craton
5 Cratón Paranapanema	5 Paranapanema Craton
6 Cratón Luiz Alves	6 Luiz Alves Craton
7 Cratón do Rio de La Plata	7 Rio de La Plata Craton
TB Lineamento Transbrasiliano	TB Trans-Brasiliano Line ament
Elementos Tectônicos Continentais	Continental Tectonic Elements
Limite Interpretado de Cratón Neoproterozoico	Interpreted Limit of Neoproterozoic Craton
Faixa Andina	Andean Belt
Cobertura Cenozoica	Cenozoic Cover
Cratón	Craton
Cinturões Móveis Neoproterozoicos	Neoprterozoic Mobie Bets
Terrenos Andinos	Andean Terrenes
Tipo de Limite da Placa	Plate Boundary Type
Crista Acrecionária Oceânica Ativa	Active Oceanic Accretionary Ridge
Zona de Subdução Ativa	Active Subduction Zone
Antiga Crista Acrecionária Oceânica	Ancient Oceanic Accretionary Ridge
Transformar zona limite	Transform boundary Zone
BIF:	BIF:
Cobertura Cenozoica	Cenozoic Caver
Cinturão Paraguai-Araguaia (600Ma)	Paragual-Amgunia Belt (600Ma)
Província Geocronológica	Geocronological Province
Rondônia-Juruona (1,8-1,5Ga)	Rondônia-Juruona(1.8-1.5Ga)
Tapajós-Parima (2,0-1,9Ga)	Tapajós-Parima(2.0-1.9Ga)
[ilegível] (1,9-1,7Ga)	Contra Amazonian (1.9-1.7Ga)
Carajás (3,0-2,0Ga)	Carajas(3.0-2.0Ga)
BIFs	BIFs
Cinturão Neoproterozoico (600Ma)	Neoproterozoic Belt (600Ma)
Cobertura Neoproterozoica	Neoproterozoic Cover
Cobertura Mesoproterozoica	Me soproterozoio Cover
Embasamento Arqueano	Archean Ba sement
Cobertura Cenozoica	Canazoic Cavar
BIFs	BIFs
Cratón Amazônico	Amazonian Craton
Bacia do Paraná	Paraná Basin
Cinturão Paraguai-Araguaia (600Ma)	Paraguai Araguaia Belt (600Ma)

Figura 6-1 - Mapa tectônico da América do Sul (Cordani et al. 2016; Gómez et al. 2019), com localização das províncias de mineração brasileiras operadas pela Vale.

6.1.1. Estratigrafia

Em geral, a Província Mineral de Carajás é composta por três domínios litoestruturais principais intercalados de acordo com faixas alongadas na direção WNW-ESE. O principal domínio mineralizado abrange a sucessão de rochas sedimentares metavulcânicas do Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988), cortadas por granitos anorogênicos, várias gerações de rochas intrusivas e cobertas por sedimentos de idade variável. Esta unidade é limitada por um embasamento de granito-gnáissico ao norte e ao sul e uma sequência de cinturões de granito-greenstone mesoarqueanos a leste, correlacionada ao Supergrupo Andorinhas (Figura 6-2 e Figura 6-3).



Legenda:

Estruturas Geológicas	Geological Structures
Sinclinal Virado	Overtuned Syncline
Anticlinal Virado	Overtuned Anticline
Falha Esquerda de Rejeito Direcional Lateral	Left Lateral Strike-Slip Fault
Falha Inferida	Inferred Fault
Falha de cavalgamento	Thrust fault
Dobras: 1 - Sinclinal de Carajás	Folds: 1 - Carajás Syncline
2 - Anticlinal de Salobo	2 - Salobo Anticline
Falhas:	Faults:
-Zona de Cisalhamento de Carajás	-Carajás Shear Zone
4-Falha de Pojuca	4-Pojuca Fault
Falha no 5Cinzento	5Cinzento Fault
6-Sistema de Falha de Buritirama	6-Buritirama Fault System
7-Sistema de Falha de Itacaiúnas	7-Itacaiunas Fault System
8-Falha MacCandless	8-MacCandless Fault
9-Falha no Anaporã	9Anapora Fault
10 Sistema de Falha de Aquiri	10 Aquiri Fault System
11-Falha de Misteriosa	11-Misteriosa Fault
12 Sistema de Falha de Canaã	(12 Canaã Fault System
13 Sistema de Falha da Serra Sul	(13 Serra Sul Fault System
14-Sistema de Falha de Sereno	14-Sereno Fault System
15 Sistema de Falha de Paraguai-Araguaia	15 Paraguay-Araguaia Faut System
Legenda	Legend
Mina	Mine
Localidade	Locality
Estratigrafia	Stratigraphy
Cinturão Araguaia	Araguaia Belt
Rochas Máficas Intrusivas (gabro e dolerite)	Mafic Intrusive Rocks (gabbro and dolerite)
Fm. Gorotire	Gorotire Fm.
Fm. Águas Claras	Águas Claras Fm.
Granitos do Tipo Paleoproterozoico	Paleoproterozoic-Type Granites
Fm. Carajás (BIF)	Carajas Fm. (BIF)
Gr. Grão Pará	Grão Pará Gr.
Intrusões Máficas e Ultramáficas Estratificadas	Mafic-Ultramafic Layered Intrusions
Granitos Arqueanos	Archean Granites
Cinturão Greenstone	Greenstone Belt
Embasamento Tipo TTG	TTG-Type Basement
Dados Técnicos	Technical Data
Projeção UT (zona 22S) DATUM SIRGAS 2000	UT Projection (zone 22S) DATUM SIRGAS 2000
Localização	Location
Cenário Geológico e Mineralização	Geological Setting and Mineralization
Mapa Geológico de Escala Regional Carajás	Regional Scale Geological Map Carajás
Executado por:	Executed by:
Escala:	Scale:
Data: Nov/2021	Date: Nov/2021
Folha:	Sheet:

Figura 6-2 - Mapa Geológico da Província Mineral de Carajás (Costa et al., 2017).

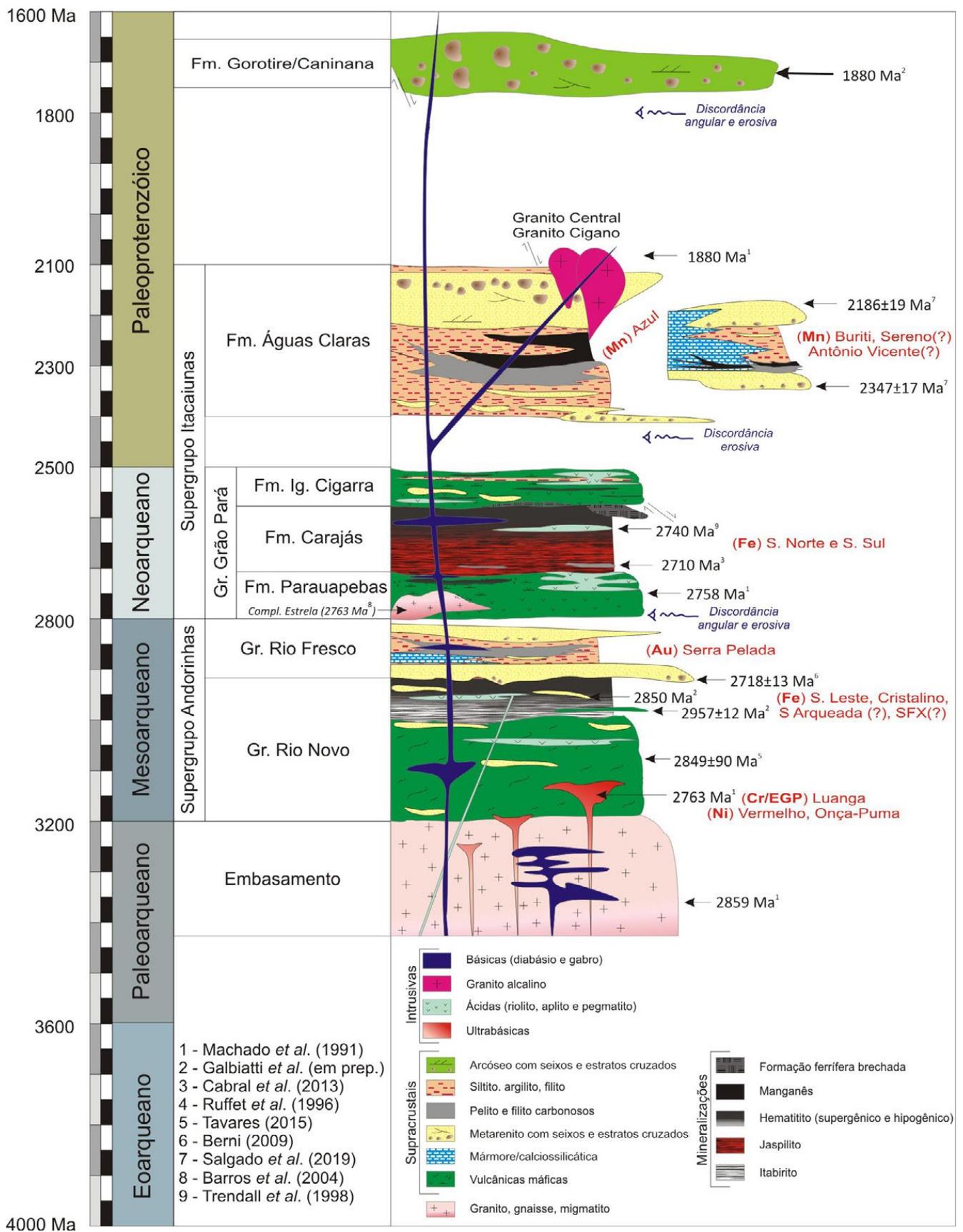


Figura 6-3 - Coluna Estratigráfica da Província Mineral de Carajás.

6.1.2. Terrenos de granito-gnáissico

Os terrenos de granito-gnáissico compreendem um conjunto de granitos Tonalito-trondhjemitogranodiorito (TTG) e gnaisses, anfíbolitos e migmatitos predominantes nos limites norte e sul da Província Mineral de Carajás, originalmente atribuídos ao Complexo Xingu (Silva et al., 1974; Hirata et al., 1982; DOCEGEO, 1988) que, com o aumento do conhecimento geológico, foi revisto e subdividido, principalmente na porção sul da Província Mineral de Carajás.

Complexo Estrela: definido por Barros (1997) como um conjunto de granitos, monzonito, sienito e diorito datando de 2.760 Ma (Barros et al., 2001), que invadem a base dos supergrupos Andorinhas e Itacaiúnas no Bloco Carajás.

Plaquê Suite: compreende corpos com a composição granodiorítica e granítica sin-colisional, com caráter cálcio-alcálico a alcalino, datado de 2.736 Ma (Avelar et al., 1999) e correlacionado com os granitos do Planalto e Serra do Rabo (Santos, 2003).

6.1.3. Supergrupo Andorinhas

Com ampla representação no Domínio Rio Maria, o supergrupo Andorinhas engloba uma sucessão Mesoarqueana (3,0 a 2,86 Ga) do tipo de cinturão granito-greenstone. Constitui uma sucessão metamórfica sob condições de fácies xisto verde a anfíbolito, composta por granitoides, rochas máficas/ultramáficas invasivas e vulcânicas, que ocorrem intercaladas com sedimentos clásticos e químicos (Macambira and Lafon, 1995; Althoff et al., 2000; Souza; et al., 2001; Dall'Agnol et al., 2006; Oliveira et al., 2009, 2011; Almeida et al., 2011, 2013). Essas litologias foram agrupadas por Santos et al. (2000) nos grupos: Babaçu, Sapucaia, Lagoa Seca, Gradaús, Tucumã e São Félix do Xingu, além dos granitoides TTG (Arco Verde, Caracol, Mahogany e Cumaru) e granitoides cálcio-alcálicos (Guarantã, Rio Maria, Mata Surrão e Xinguara). Nas porções leste e sul do domínio Carajás, há um conjunto de rochas metavulcanossedimentares correlacionadas ao Supergrupo Andorinhas (DOCEGEO, 1988), aqui subdividido nos grupos Rio Novo e Rio fresco.

Grupo Rio Novo: originalmente definido na região da Serra Leste como uma sequência de tipo cinturão greenstone, metamorfoseada em fácies xisto verde, com rochas e sedimentos máficos, ultramáficos e félsicos (Hirata et al., 1982; Meireles et al., 1982). A base é composta por xistos com proporções variadas de clorito e anfíbio, que estão incorporados com lentes de metassedimentos, incluindo o itabirito anfíbolito, que se classifica como itabirito silicoso no topo.

Grupo Rio Fresco: originalmente definido como toda a cobertura de Carajás (Hirata et al., 1982; Meireles et al., 1982; DOCEGEO, 1988), agora está restrito aos metassedimentos que cobrem as rochas do Grupo Rio Novo na região da Serra Leste e Serra Pelada. Esta unidade é composta por uma sucessão de meta-arenitos e metapelitas (localmente carbonosas), com níveis descontínuos de mármore dolomítico (Figura 6-1 e Figura 6-2).

6.1.4. Complexos máficos-ultramáficos

São complexos como Luanga (Medeiros Filho and Meireles, 1985; Suita et al., 1988; Ferreira Filho et al., 2007) e os relacionados (Onça-Puma, Vermelho e Madeira), datados de 2.763 Ma (Machado et al., 1991) que ocorrem como intrusões no embasamento e na porção basal das rochas atribuídas ao Grupo Rio Novo (Figura 6-1 e Figura 6-2). Eles abrigam depósitos de Ni e Cr e apresentam o mesmo padrão de deformação dos xistos do Grupo Rio Novo, indicando contemporaneidade. A forte deformação e evidência de metamorfismo do Gabro Santa Inês (DOCEGEO, 1988), que ocorre como um corpo leucogabro anortosítico intrusivo no embasamento e base do Grupo Rio Novo, sugerem posicionamento cronocorrelacionado às rochas ultramáficas.

6.1.5. Supergrupo Itacaiúnas

O Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988; Figura 6-2 e Figura 6-3) é uma sucessão Neoarqueana que engloba o Grupo Grão Pará (CVRD/AMZA, 1972; Beisegel et al., 1973) e suas unidades correlacionadas (Igarapé Salobo, grupos Igarapé Pojuca e Igarapé Bahia; DOCEGEO, 1988).

Grupo Grão Pará: foi definido pela equipe CVRD/AMZA (1972) e nomeado em homenagem ao nome original da capitania que atualmente corresponde ao estado do Pará. É composto por uma sequência vulcanossedimentar da idade neoarqueana, onde a camada mineralizada ocorre intercalada com duas camadas de rochas vulcânicas máficas, denominadas, de baixo para cima, como Formação Parauapebas, Formação Carajás e Formação Igarapé Cigarra.

A Formação Parauapebas foi originalmente definida pela equipe CVRD/AMZA (1972) como a sequência Paleovulcânica Inferior e posteriormente renomeada devido à ocorrência de vulcões félsicos (Machado et al., 1991). A idade dessa unidade é bem definida pela datação U/Pb, com resultados em torno de 2.750 Ma (Wirth et al., 1986; Lindenmayer et al., 1998; Tavares, 2015). A sucessão ocorre de acordo com um corpo estratiforme de espessura indeterminada (>200 m), que representa o empilhamento de vários fluxos em contato transicional conformável (<1 m) com os sedimentos sobrejacentes.

A Formação Carajás foi nomeada pela equipe CVRD/AMZA (1972) por formar as principais cristas da Serra dos Carajás. Esta unidade consiste em formações ferríferas depositadas durante a idade Neoarqueana (2.740 Ma., Trendall et al., 1998) e abriga os depósitos de minério de ferro de classe mundial da Província Mineral de Carajás. Em geral, ocorre como grandes corpos descontínuos, que definem o relevo nos platôs de canga, que inibem o crescimento da floresta tropical, típica da região circunvizinha (Figura 6-4).



Figura 6-4 - Platôs de S11D (esquerda) e N1 (direita) da Província Mineral de Carajás.

A espessura das formações ferríferas varia entre os diferentes platôs e é normalmente proporcional à sua área no plano, geralmente variando entre 100-200 m, e pode ultrapassar 500 m nos depósitos principais (Figura 6-4). Hematitas estão distribuídas por toda a província e constituem minérios de alto teor (> 60% Fe). Elas são classificadas de acordo com sua compactidade e contaminantes (quando presentes) e estão associadas a processos supergênicos e hipogênicos desenvolvidos no jaspilito (Lobato et al., 2005; Silva et al., 2008). O minério supergênico friável é o tipo predominante, ocorrendo desde a superfície até a profundidade média de 150 m, excedendo 300 m nos principais depósitos (Figura 6-5).

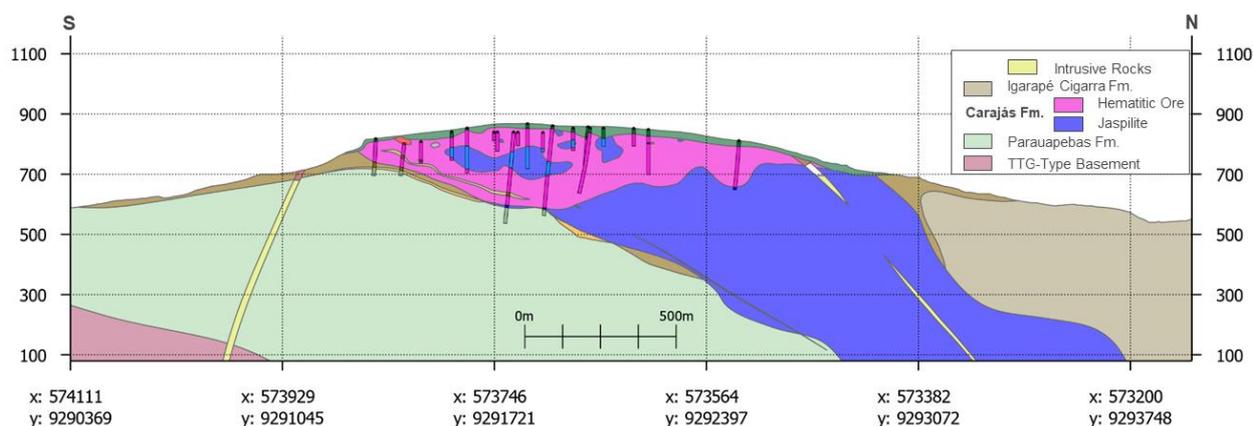


Figura 6-5 - Seção transversal geológica da mina S11D, Província Mineral de Carajás

A Formação Igarapé Cigarra foi originalmente definida pela equipe CVRD/AMZA (1972) como a sequência Paleovulcânica Superior e posteriormente renomeada devido à identificação de níveis sedimentares (Macambira, 2003). Ocorre de acordo com um corpo estratiforme, em conformidade com o bandamento de formações ferríferas, com espessura de cerca de 300-400 m (CVRD/AMZA, 1972). É composto predominantemente por basaltos com intercalações de tufos e sedimentos clásticos e lentes de formação ferrífera (Macambira, 2003). Na Serra Sul, o contato entre a Formação Carajás e a Formação Igarapé Cigarra é marcado localmente por um horizonte de brecha na formação ferrífera.

6.1.6. Intrusões e coberturas proterozoicas

A Formação Águas Claras é a principal cobertura sedimentar que recobre o Grupo Grão Pará na Província Mineral de Carajás. Foi originalmente definida pela equipe CVRD/AMZA (1972) como a Formação Gorotire, posteriormente renomeada como Formação Rio Fresco (Hirata et al., 1982; DOCEGEO, 1988), recebendo sua atual designação a partir dos trabalhos de Nogueira (1995), que caracterizou o ambiente de sedimentação desta unidade. Constitui um pacote de pelitos e arenitos com cerca de 1.500 m de espessura, subdivididos respectivamente nos membros Inferior e Superior, que ocorrem sobrepostos às rochas do Grupo Grão Pará por discordância erosiva (Figura 6-1). A idade desta unidade ainda não está bem definida, mas estudos recentes indicam que sua deposição seria inferior a 2,45 GA (Cabral et al., 2017), compatível com a faixa etária definida para os quartzitos da Formação Buritirama (2.186-2.347 Ma, Salgado, et al., 2019). O minério de manganês da mina do Azul está associado aos pelitos do Membro Inferior desta unidade, que está correlacionado, em termos de idade e ambiente, com a mina de manganês Buritirama e os depósitos de Sereno e Antônio Vicente.

O conjunto Serra dos Carajás é composto por um conjunto de granitos cálcio-alcálicos a alcalinos anorogênicos e diques de ácidos, pós-tectônicos, que cortam as rochas do Complexo Xingu, do Supergrupo Andorinhas, do Supergrupo Itacaiúnas e a Formação Águas Claras (DOCEGEO, 1988). Os granitos Central, Cigano, Pojuca e Musa são datados entre 1.800-1.900 Ma (Gibbs et al., 1986; Machado et al., 1991); portanto, cronocorrelaciona-se com o Magmatismo Uatumã.

A Formação Gorotire, também conhecida como Unidade Caninana (Pereira, 2009; Pereira et al., 2009), constitui uma cobertura siliciclástica composta por conglomerados e arenitos arcoseanos com cerca de 300 m de espessura (Barbosa et al., 1966), formada em um ambiente fluvial entrelaçado (Oliveira e Nascimento, 2013; Nascimento e Oliveira, 2015) em uma bacia restrita desenvolvida durante a reativação da Falha de Carajás (Lima e Pinheiro, 2001).

Intrusivas Máficas: o Gabro Rio da Onça (Tavares, 2015) e o Diabásio Rio Pajeú (Macambira et al., 2014) ocorrem como diques indeformados de direção próxima a N-S, cortando todas as unidades mencionadas. Esses diques tem continuidade por centenas de quilômetros e possuem uma forte assinatura magnética, sendo facilmente observados em produtos de aerolevanteamento.

6.1.7. Unidades cenozoicas e cobertura recente

Cangas: comumente formadas a partir do intemperismo das formações ferríferas ou da concentração residual de óxidos de ferro e de alumínio das rochas hospedeiras. Elas são divididas em função da sua estrutura, composição e teor de ferro, em tipos estruturados (ricos ou de minério), detrítica e química (ou laterita). Geralmente apresentam altas concentrações de alumínio, fósforo e manganês, que desfavorece seu uso como minério. No entanto, podem constituir uma fração de ROM em forma diluída, sendo, portanto, passíveis de aproveitamento econômico. Grande parte das cavidades registradas em Carajás está associada aos domínios de cangas, principalmente na borda dos platôs.

Depósitos elúvio-coluvionares: formam pequenos depósitos descontínuos e de pouco interesse econômico na base e nas encostas dos platôs.

Alúvios: não formam depósitos significativos de minério de ferro.

6.1.8. Metamorfismo e deformação

A Província Mineral de Carajás registra uma evolução tectônica polifásica, atestada por seu amplo espectro de distribuição de idades e pela elevada complexidade de seu arranjo estrutural (Figura 6-2 e Figura 6-3).

A compilação de estruturas e dados geocronológicos suporta a interpretação de três momentos principais de deformação (ou ciclos tectônicos), responsáveis pela arquitetura da Província Mineral de Carajás:

O Ciclo Arqueano compreende o principal período de crescimento crustal na Província Mineral de Carajás, responsável pela formação e deformação do embasamento TTG (Complexo Xingu e relacionado), deposição e deformação, com metamorfismo de baixo grau, das rochas do Supergrupo Andorinhas, terminando com a sedimentação do Grupo Grão Pará. Estudos recentes (Ganad et al., em preparação) propõem sua subdivisão nos eventos: G1 (3.015-2.920 Ma), G2 (2.880-2.835 Ma), G3 (2.780-2.720 Ma) e G4 (2.590-2.530 Ma). Os dois primeiros eventos associam-se a uma tectônica de domos e quilhas. Os últimos eventos relacionam-se à abertura da Bacia de Carajás e ao desenvolvimento do primeiro sistema IOCG.

As principais estruturas atribuídas a este ciclo são dobras com o eixo em torno de E-W, presentes no embasamento e nas sequências *greenstone belt* do Supergrupo Andorinhas (como os sinclinais de Serra Pelada, Rio Maria; DOCEGEO, 1988), e a implementação de um sistema de falhas (falhas de Carajás e Cinzento), em primeiro momento com caráter transtensional sinistral (Araújo e Maia, 1991; Pinheiro, 1997; Pinheiro e Holdsworth, 2000).

O Ciclo Paleoproterozoico é o evento responsável pela atual geometria da província. Ocorreu sem registro de metamorfismo significativo e está registrado em dobras de escala regional vertentes SSW, como o Sinclinal de Carajás (CVRD/AMZA, 1972; Beisegel et al., 1973). Este evento também é responsável pela reativação de falhas em regime transcorrente dextral (Araújo e Maia, 1991; Pinheiro, 1997; Pinheiro e Holdsworth, 2000) e para a colocação do primeiro sistema IOCG (Ganad et al., em preparação).

Falhas e dobras correlacionadas a esse ciclo são importantes do ponto de vista prospectivo, pois interferem na espessura e na geometria das formações ferríferas e podem ter sido responsáveis pela formação hipogênica de corpos de alto teor.

O Ciclo Neoproterozoico/Paleozoico é equivalente à Orogênese Brasileira (700-450 Ma), que define os atuais limites cratônicos do interior da Plataforma Sul-americana (Almeida et al., 1973; Almeida et al., 1981; Cordani et al., 2016; Gómez et al., 2019). Este evento expressa o desenvolvimento de uma faixa vigente para oeste e é caracterizado por uma sequência de dobramentos e falhamentos na direção N-S. É marcado principalmente pelo desenvolvimento de estruturas de natureza rúptil-dúctil, como dobras no estilo *kink*, normalmente com eixo em torno de N-S que ocorrem em variadas escalas, além da intrusão de diques máficos com orientações semelhantes a desses eixos de dobras.

As estruturas deste ciclo interferem nos depósitos, com variação da espessura e geometria das formações ferríferas (seja por duplicação de camadas por dobramentos e falhamentos ou omissão

das mesmas, por falhamentos), além da formação hipogênica de corpos de alto teor em zonas de falhas.

6.2. Geologia local

6.2.1. Fisiografia

Os platôs do Complexo Serra Norte constituem, de forma geral, áreas elevadas, com cotas entre 650-800 m, limitados a norte pelo domínio de rochas vulcânicas da Formação Parauapebas, que configuram uma extensa planície, com cotas entre 200-400 m, e a sul pelo domínio dos sedimentos terrígenos da Formação Águas Claras ao sul, que apresentam morfologia de cristas e vales intercalados, alinhados segundo a direção NW-SE, com cotas variando de 500-700 m (Figura 6-6).

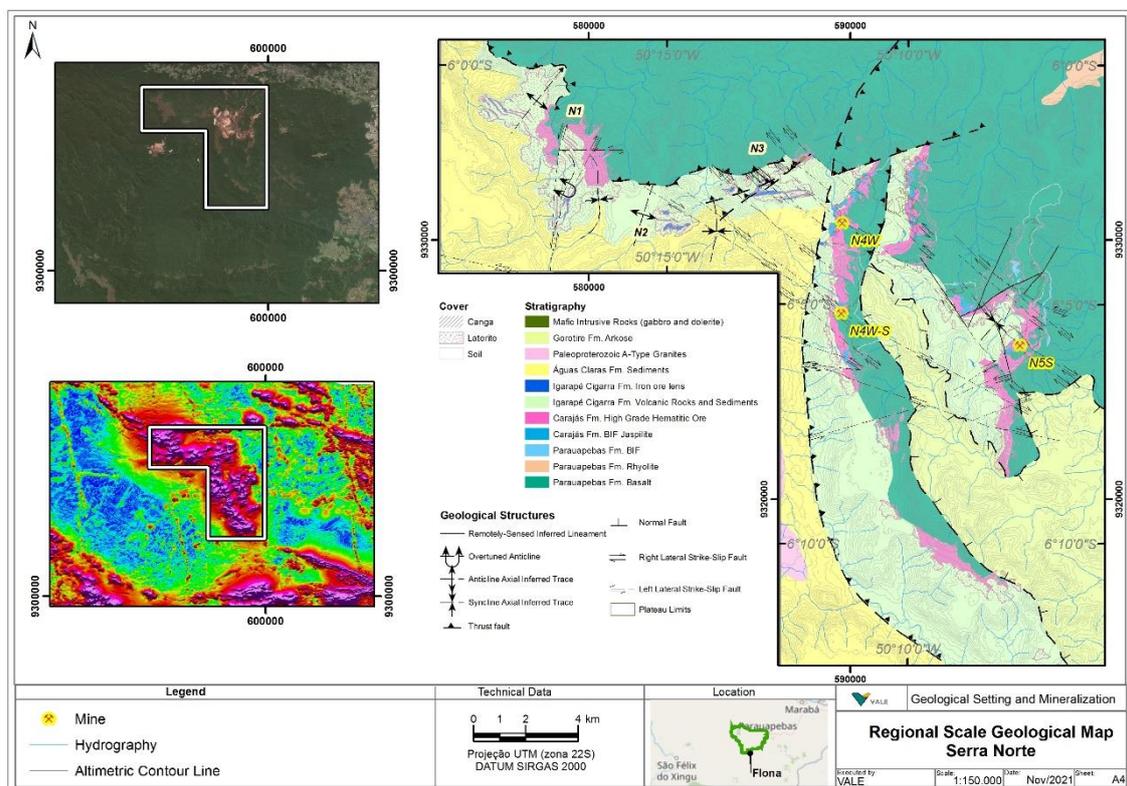


Figura 6-6 - Geologia do Complexo Serra Norte (direita) e imagens de satélite e aerogeofísicas (MAG)

6.2.2. Estratigrafia

A sucessão estratigráfica de Serra Norte abrange toda a Supergrupo Grão Pará e Formação Águas Claras, além das coberturas sedimentares Cenozoicas e recentes.

Os principais depósitos de minério de ferro são abrigados principalmente na Fm. Carajás, que faz parte da sequência metavulcanossedimentar Neo-Arqueana do Grupo Grão Pará (Supergrupo Itacaiúnas), que sobrepõe o embasamento cristalino e a sequência do *greenstone belt* Mesoarqueano do Supergrupo Andorinhas e são cobertos pelos sedimentos terrígenos das formações Gorotire e Águas Claras e foram cortados por rochas intrusivas ácidas e básicas.

Rochas máficas são as rochas hospedeiras da formação ferrífera, ocorrendo tanto na base quanto no topo da mesma. Elas são representadas pelas rochas máficas das formações Parauapebas (fundo) e Igarapé Cigarra (topo), de acordo com Macambira (2003). As rochas máficas correspondem principalmente a basaltos. Para fins de modelagem geológica, não foram classificadas nas referidas unidades estratigráficas, e são consideradas apenas como rochas

máficas, discriminadas em máfica decomposta (MD), máfica semidecomposta (MSD) e máfica sã (MS). Além de sua ocorrência como rocha hospedeira (topo e base da formação ferrífera), elas também ocorrem como soleiras e diques máficos em formações ferríferas.

Máfica decomposta (MD) – Apresenta elevado grau de alteração, pouco estruturada, com coloração variando de avermelhada a amarelada, argilosa, com consistência predominantemente macia.

Máfica semidecomposta (MSD) – É um termo intermediário entre MS e MD, por vezes ainda apresentando relictos da trama original das rochas, porém já com profunda transformação mineralógica, e conseqüentemente, sua coloração.

Máfica sã (MS) – rocha não afetada pelo intemperismo, sistematicamente cloritizada e que corresponde ao produto da hidratação de basaltos e diabásios. Apresenta coloração verde escura, por vezes com estruturas vulcânicas típicas, como amígdalas de quartzo. Variações composicionais e mesmo sedimentos clásticos e químicos não ferrosos foram agrupados sob esta denominação para efeito de simplificação das seções geológicas.

6.2.3. Mineralização

A Província Mineral de Carajás abriga depósitos de classe mundial de Fe, Cu, Au, Mn e Ni, resultantes da evolução tectônica polifásica, acompanhada de processos de enriquecimento hipogênico e supergênico, desenvolvidos em rochas sedimentares e magmáticas do núcleo Arqueano do Cratón Amazônico.

A mineralização ocorre principalmente como produto do enriquecimento supergênico, desenvolvido em jaspilitos (BIFs tipo algoma intercalados com basaltos) em regiões altas e planas que compõem os platôs observáveis por sensores remotos. A irregularidade e descontinuidade dos depósitos ao longo desta província mineral demonstra a existência de estruturas herdadas de eventos deformacionais que favoreceram o espessamento do jaspilito e a eficiência de processos supergênicos através do basculamento e fraturamento dessas rochas.

Os diferentes tipos de formação ferrífera e rochas hospedeiras do distrito de Serra Norte são descritos abaixo. Os teores médios mencionados referem-se aos teores das amostras (ponderados pelo comprimento) de cada litotipo modelado nesta revisão, considerando a classificação interpretada (CLI).

As cangas representam um produto do intemperismo nas sequências de rocha típicas da região. Para modelagem, são divididas em dois tipos diferentes: canga estrutural (CE) com teores de ferro maiores ou iguais a 55%, produtos do intemperismo da formação ferrífera e canga química (CQ), que está cobrindo as rochas máficas.

Canga química (CQ) – representa as crostas ferro-aluminosas que normalmente cobrem as rochas máficas decompostas. Possui uma textura colóide e alta porosidade. Muitas vezes tem um alto teor de Al_2O_3GL , evidenciado pela coloração clara de gibbsita e minerais de argila. Fragmentos de hematita são escassos ou ausentes. Em geral, o teor de ferro é inferior a 55%, com fósforo elevado e Al_2O_3GL .

Canga estrutural (CE) – termo comumente usado pela Vale para designar crostas lateríticas ferruginosas. Geralmente está localizada sobre afloramentos de minério de ferro *in situ*. Também ocorre como canga transportada, mas a uma curta distância da área de origem, sendo um bom indicador da localização dos corpos de minério. A espessura é variável, atingindo mais de 20 metros. Possui teor de ferro acima de 55% e teores relativamente baixos de Al_2O_3GL e fósforo, permitindo assim sua potencial utilização como minério de ferro.

Jaspilito (JP) – formação ferrífera bandada, geralmente da fácies de óxido, composta pela alternância de bandas de minerais opacos, como hematita (predominantemente), magnetita ou martita, e bandas avermelhadas ou brancas compostas por jaspe e/ou chert. Os cristais de hematita ocorrem principalmente na forma de hematita microcristalina e lamelar, além de martita e magnetita, sendo a magnetita pouco comum e geralmente martitizada, com relictos de kenomagnetita (Lobato et al. 2005). O jaspilito é cinza avermelhado e representa o protore dos depósitos de ferro de Carajás. Ocorre predominantemente na base das formações ferríferas, em contato com rochas máficas ou sob a forma de lentes, imersas em uma grande massa de hematita friável. A espessura

das lentes costuma ser pequena (poucos metros), variando de centímetros a cerca de 20 m. O jaspilito que ocorre na porção basal pode atingir até 350 m de espessura, sendo desconhecida a continuidade em profundidade em algumas regiões da mina. Na grande massa de jaspilito, que constitui a base da formação ferrífera, as lentes de hematita, mais comumente hematita friável, são observadas em regiões próximas ao contato topo jaspilito/hematita.

Hematita friável (HF) – é o tipo predominante de minério, ocorre ao longo de todas as minas. Apresenta-se comumente bandada, localmente exibindo planos de laminação primária. Consiste em material hematítico friável de cor cinza e brilho metálico, com alta porosidade. Pode ser pulverulento ou desagregar em pequenos fragmentos (placoides ou não).

Os cristais de hematita ocorrem principalmente na forma de hematita microcristalina, lamelar, anédrica-subédrica e euédrica-subédrica, além de martita, como pseudomorfos de magnetita (Lobato et al. 2005). Ela é formada predominantemente pelo enriquecimento supergênico do protominério (jaspilitos). Possui espessura variável no perfil de enriquecimento, atingindo até 350 m e grande continuidade ao longo do mergulho.

Hematita compacta (HC) – um material rico em ferro e, como as HFs, gerada a partir da alteração intempérica do jaspilito. Possui coloração variando do preto a marrom avermelhado, sendo esta última típica de cimentação por goethita/limonita, cimentação esta entendido como responsável pela elevada compactidade deste litotipo. A HC ocorre de forma subordinada em todo o depósito, como lentes dentro da grande massa de hematita friável, geralmente com espessuras em torno de 5 a 10 m, sem muita continuidade lateral (poucas dezenas de metros). Localmente, podem atingir espessuras de até 50 m. A cor da HC é cinza azulada com brilho metálico. É bastante densa, com baixa porosidade, e pode ser bandada, caracterizada pelo bandamento original do jaspilito preservado, definido por níveis compactos alternando por níveis porosos ou brechados. Este litotipo também pode ser maciço, com trama original totalmente destruída, composta por agregados de cristais de hematita. O teor de Fe está entre 59 e 69%. Al_2O_3GL representa um contaminante importante nesta litologia.

Hematita manganesífera (HMN) – A hematita manganesífera tem coloração cinza escuro fosca, ocorrendo em lentes com espessuras que variam de 5 a 10 m, e localmente, pode localmente atingir espessuras de 60 m, sem muita continuidade lateral, dispersa na massa de hematita friável. A HMN é um material rico em Fe com teor de Mn superior a 2% (global calculada). Normalmente se posicionam na base dos corpos de hematitito, provável zona de acúmulo de Mn lixiviada dos horizontes intemperizado.

Ferro Manganês (FMN) – É um material que, aparentemente representa um produto intermediário da alteração intempérica do jaspilito, enriquecido com Mn. Ocorre como pequenas lentes (geralmente poucos metros de espessura, atingindo até 30 m), com pouca continuidade lateral, dentro da massa de hematita friável.

6.2.4. Estrutural

Em termos gerais, os principais depósitos de minério de ferro de Carajás estão associados a platôs elevados de topo plano, definidos ao longo de dois principais alinhamentos morfológicos correspondentes à Serra Norte e Serra Sul. Esses alinhamentos materializam os flancos da estrutura definida como Sinclinal de Carajás (Figura 6-2), que atinge cerca de 150 km de comprimento e 100 km de largura (CVRD/AMZA, 1972; Beisegel et al., 1973). A região da Serra da Bocaina, também conhecida como platô de Água Boa, corresponde à zona de fechamento deste sinclinal e apresenta uma grande concentração de protominério do tipo jaspilito. Esta região não deve ter experimentado as condições ideais para a formação de depósitos significativos de minério de ferro ou mesmo de preservação de um eventual depósitos previamente formado.

O Complexo Serra Norte corresponde ao domínio geológico do flanco invertido do Sinclinal de Carajás. O alto padrão de deformação deste domínio está refletido na geometria e distribuição das formações ferríferas, cuja segmentação por falhas, como a Falha de Carajás (Pinheiro e Holdsworth, 1997) e por dobras de diversas orientações e escalas, individualizam os platôs de N1 a SN9 (Figura 6-5).

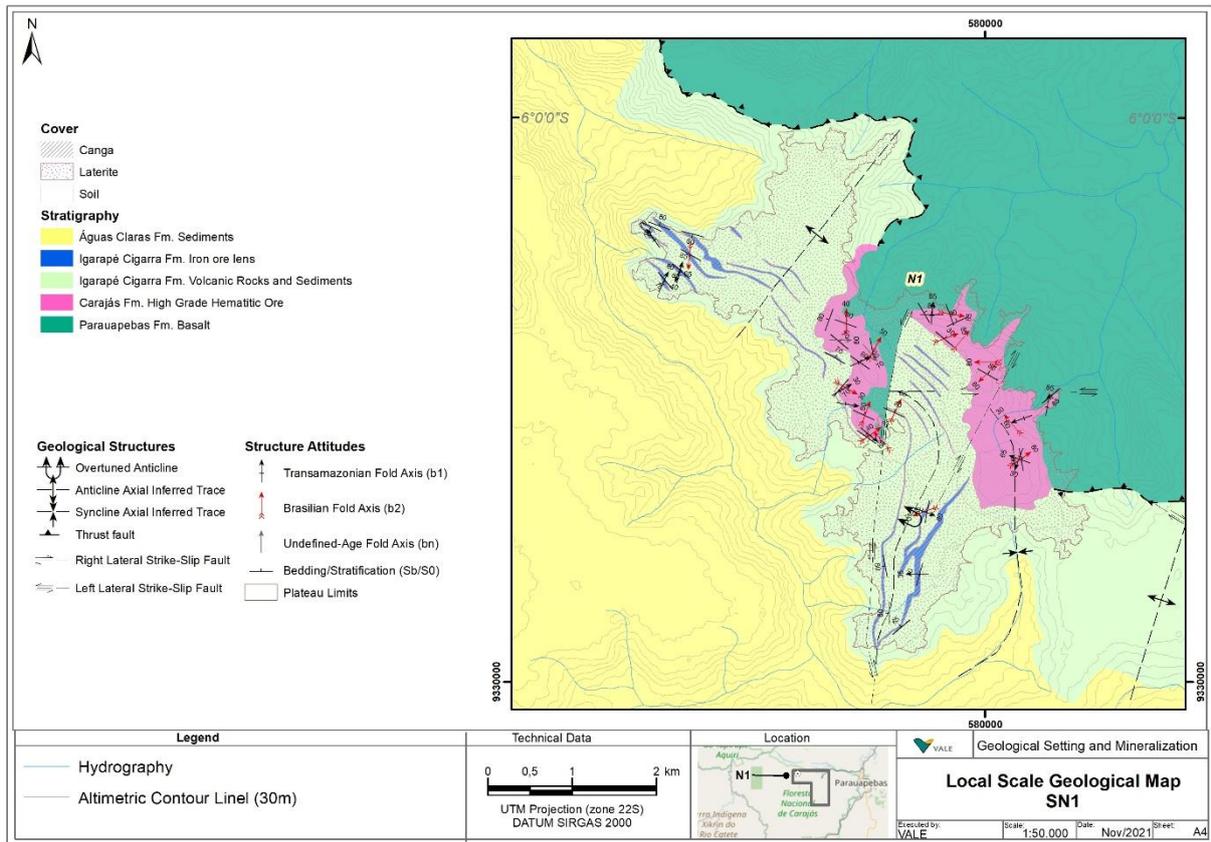
6.3. Geologia da propriedade

6.3.1. Platô N1

O depósito N1 está localizado no extremo oeste da Serra Norte e corresponde a parte do platô homônimo (Figura 6-5).

6.3.1.1. Dimensões do depósito

Este platô tem uma forma alongada na direção NW-SE, com dimensões de cerca de 6 km x 3 km e elevações entre 650-800 m. É composto predominantemente por rochas das formações de Carajás e Igarapé Cigarra do Grupo Grão Pará, que fazem contato com rochas da Formação Parauapebas na borda nordeste do platô, e Formação Águas Claras no sudoeste. Em geral, as camadas apresentam mergulhos de médio a alto ângulo para nordeste, configurando um empilhamento estratigráfico invertido. (Figura 6-7).



Legenda:

Cobertura

Canga
Laterita
Solo

Estratigrafia

Sedimentos da Fm. Águas Claras
Lentes de minério de ferro da Fm. Igarapé Cigarra
Rochas Vulcânicas e Sedimentos da Fm. Igarapé Cigarra
Minério Hematítico de Alto Teor da Fm. Carajás
Basalto da Fm. Parauapebas

Estruturas Geológicas

Anticlinal Virado
Traço Inferido Axial Anticlinal
Traço Inferido Axial Sinclinal
Falha de cavalgamento
Falha Direita de Rejeito Direcional Lateral
Falha Esquerda de Rejeito Direcional Lateral

Atitudes Estruturais

Eixo de Dobra Transamazônica (b1)
Eixo de Dobra Brasileira (b2)
Eixo de Dobra de Idade Indefinida (bn)
Acamamento/Estratificação (Sb/S0)
Limites do Platô

Legenda

Hidrografia
Linha de Contorno Altimétrico (30 m)

Dados Técnicos

Projeção UTM (zona 22S) DATUM SIRGAS 2000

Localização

Cenário Geológico e Mineralização
Mapa Geológico de Escala Local SN1
Executado por:
Escala:
Data: Nov/2021
Folha:

Cover

Canga
Laterite
Soil

Stratigraphy

Águas Claras Fm. Sediments
Igarapé Cigarra Fm. Iron ore lens
Igarapé Cigarra Fm. Volcanic Rocks and Sediments
Carajás Fm. High Grade Hematitic Ore
Parauapebas Fm. Basalt

Geological Structures

Overtuned Anticline
Anticline Axial Inferred Trace
Syncline Axial Inferred Trace
Thrust fault
Right Lateral Strike-Slip Fault
Left Lateral Strike-Slip Fault

Structure Attitudes

Transamazonian Fold Axis (b1)
Brazilian Fold Axis (b2)
Undefined-Age Fold Axis (bn)
Bedding/Stratification (Sb/S0)
Plateau Limits

Legend

Hydrography
Altimetric Contour Linel (30m)

Technical Data

UTM Projection (zone 22S) DATUM SIRGAS 2000

Location

Geological Setting and Mineralization
Local Scale Geological Map SN1
Executed by:
Scale:
Date: Nov/2021
Sheet:

Figura 6-7 - Mapa geológico N1

6.3.1.2. Litologias

A Formação Parauapebas ocorre fora do platô e marca a base do Grupo Grão Pará. É formada por um espesso derrame de basaltos e andesitos basálticos, localmente amigdaloidais e vesiculares, comumente hidrotermalizados, que ocorrem sotopostos às rochas da Formação Carajás, por um contato concordante transicional. Na região N1, eles são frequentemente representados por clorititos cortados por veios de carbonato e hematita.

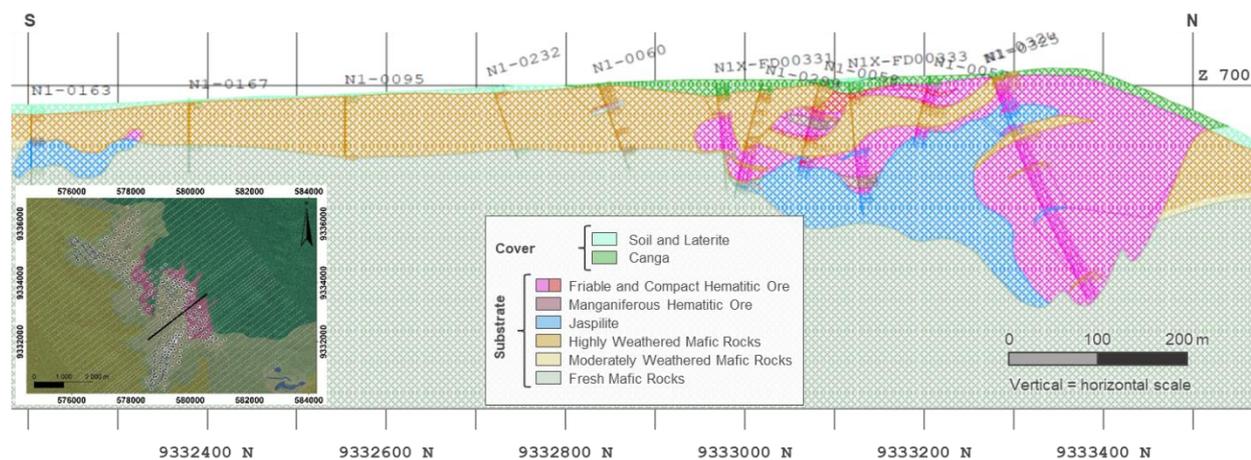
A Formação Carajás compreende cerca de 20% da área do platô e corresponde ao domínio de maior potência das formações ferríferas. Coincide com as maiores cotas e ocorre de forma contínua por toda a borda nordeste do platô, desde as proximidades do contato com as rochas da Formação Parauapebas, até sua porção central, onde faz contato transicional com as rochas da Formação Igarapé Cigarra (Figura 6-7).

As formações ferríferas do domínio da Formação Carajás ocorrem segundo uma camada tabular subverticalizada com mergulho variável ora para nordeste ora para sudoeste. Dessa forma, sua espessura no plano tende a refletir a espessura da camada, que varia entre 250-600 m e é fortemente controlada por dobras e falhas (Figura 6-8).

A Formação Igarapé Cigarra é, por sua vez, constituída por grandes volumes de rochas vulcânicas, principalmente derrames e tufos, de caráter bimodal, que ocorrem intercalados a lentes de sedimentos químicos e, subordinadamente, terrígenos. As formações ferríferas desta unidade ocorrem ao lado de longos corpos verticalizados com espessura, em planta, variando entre 30-200

m, média de 50 m, em geral segundo pares de camadas paralelas, que reflete o processo de dobramento.

Observa-se, também, tanto em testemunhos de sondagem como em afloramentos, que as formações ferríferas N1, principalmente no domínio da Formação Carajás, ocorrem intercaladas a diversos corpos de rochas máficas, com orientação variável, geralmente de pouca espessura. Esses corpos têm composição básica/intermediária e fazem contatos concordantes ou discordantes com o bandamento composicional das formações ferríferas, configurando sills e diques (Figura 6-8).



Legenda:

Cobertura

Solo e Laterita
Canga

Substrato

Minério Hematítico Friável e Compacto
Minério Hematítico Manganífero
Jaspilito
Rochas Máficas Altamente Desgastadas
Rochas Máficas Moderadamente Desgastadas
Rochas Máficas Sãs

Vertical = escala horizontal

Cover

Soil and Laterite
Canga

Substrate

Friable and Compact Hematitic Ore
Manganiferous Hematitic Ore
Jaspilite
Highly Weathered Mafic Rocks
Moderately Weathered Mafic Rocks
Fresh Mafic Rocks

Vertical = horizontal scale

Figura 6-8 - Seção geológica N1

6.3.1.3. Estruturas

Em N1, as camadas estão dispostas na direção NW-SE, e o traçado em planta e em seção das formações ferríferas de N1 mostra o seu forte controle estrutural, onde as falhas e dobras condicionam sua espessura e continuidade (Figura 6-7 e Figura 6-8). As principais estruturas que controlam a mineralização são reconhecidas desde os trabalhos da década de 70 (CVRD/AMZA, 1972; Beisegel et al., 1973) e serão apresentadas abaixo em ordem cronológica, da estrutura mais antiga para a mais jovem e relacionadas aos prováveis eventos tectônicos responsáveis por sua geração:

Estruturas correlacionadas ao tectonismo Transamazônico:

- Falha de empurrão para SW, localizada ao norte e a leste do platô, no contato entre os litotipos da Formação Parauapebas e da Formação Igarapé Cigarra (Figura 6-7). Esta falha marca a omissão total ou parcial das rochas da Formação Carajás, principalmente fora do domínio do platô;
- Eixos de dobras fechadas a isoclinais recumbentes, com direção NW-SE e flancos mergulhando para NE, rastreáveis por 1,5 km em média, em raros casos maiores que 3 km (Figura 6-7 e Figura 6-8). Essas estruturas podem ocorrer rotacionadas, em função da superposição de eventos

tectônicos mais jovens, e são observadas principalmente nas formações ferríferas do domínio da Formação Igarapé Cigarra e mais difíceis de serem notadas no domínio da Formação Carajás, onde predominam em contato próximo com as rochas da Formação Parauapebas;

- Falha transcorrente sinistral da direção N-S, na porção central do platô. Essa estrutura é caracterizada pela formação de brechas, rotação de elementos estruturais (como acamamento e eixos de dobras) e pela descontinuidade do corpo principal de formação ferrífera, que ocorre no bloco oeste com espessura reduzida (Figura 6-8); e
- Sistema de pequenas falhas transcorrentes sinistrais, orientação NE-SW, localizado na porção central do platô e responsável pelo prolongamento de seções da formação ferrífera na direção NE (Figura 6-8).

Estruturas correlacionadas à tectônica Brasileira:

- Eixos de dobras abertas, com direção variando de NE-SW a NS, rastreadas por longas distâncias, observadas principalmente nas formações ferríferas do domínio da Formação Igarapé Cigarra e, em geral, refletidos como dobras no estilo *kink* nas formações ferríferas do domínio da Formação Carajás.
- Falha na transcorrente sinistral da direção E-W, posicionada na porção central do platô e responsável pelo estreitamento da porção norte do corpo principal de formação ferrífera. Essa falha ocorre associada com uma forte anomalia magnetométrica e com uma zona fraturada com cerca de 500 m de espessura em planta, localmente brechada. É comum observar parte dessas fraturas preenchidas por veios métricos de magnetito compacto com até dois metros de espessura que transpõem o bandamento, sugerindo alteração hidrotermal. A oeste da grande falha transcorrente N-S, a falha de direção E-W assume a direção de cisalhamento dextral (Figura 6-7).

6.3.1.4. Mineralização

Mineralização em N1 é formada principalmente da alteração supergênica do jaspilito, que constitui o protominério de Carajás. O minério de alto teor é constituído por Hematitito Friável, Hematitito Compacto e Hematitito Manganésífero, que ocorrem segundo uma camada tabular subhorizontal, que tende a acompanhar a superfície topográfica, comumente coberto por carapaça de canga, também considerada como um litotipo mineralizado.

A hematite friável (HF) corresponde a 80% da mineralização, e na área onde formação ferrífera apresenta maior potência em planta, a espessura máxima é de 400 m, com teor médio de ferro global de 66,677% Fe e densidade média de 3,03 g/cm³. Apresenta alta porosidade, coloração cinza escuro e textura laminada a bandada, localmente foliada ou brechada. Ele pode ser pulverulento ou se desagregar em pequenas placas e fragmentos. É essencialmente constituído por óxidos de ferro, principalmente hematita e martita, com magnetita subordinada, além de goethita e limonita nos horizontes de baixa profundidade. Os cristais de hematita são principalmente microcristalinos em formas lamelar, granular ou pseudomórfica em pequenos cristais euédricos-subédricos de magnetita. Nas proximidades dos contatos com rochas máficas, é comum apresentar contaminação por manganês, alumínio e fósforo, enquanto a sílica figura como contaminante nas proximidades do contato com os jaspilitos. A HF também pode conter pequenas lentes/bandas/passagens de hematitito compacto.

O Hematitito Compacto (HC) corresponde a 7% da mineralização e geralmente ocorre segundo veios, preenchendo fraturas ou associado a rochas máficas, sugestivo de origem hipogênica. Em geral, apresenta espessuras decimétrica a métrica, máximo de 70 m, teor médio de ferro global de 66,13% Fe e densidade média de 3,61 g/cm³. É uma rocha de coloração cinza azulado, de brilho metálico e textura maciça, raramente foliada, podendo preservar os relictos de bandamento, marcados por diferenças na textura e no tamanho dos cristais. Possui baixa porosidade e é essencialmente constituída por óxidos de ferro, principalmente hematita, algumas vezes especular e martita.

O hematitito Manganésífero (HMN) é muito subordinado, correspondendo a 1% da mineralização. Geralmente ocorre próximo ao contato com rochas máficas, como lentes descontínuas de até 25 m de espessura, com densidade média de 3,81 g/cm³ e cerca de 62,12% Fe e 3,8% Mn. Apresenta

coloração cinza esverdeado escuro, brilho fosco, elevada porosidade, e é constituída pela associação de hematita, pirolusita, bixbiita, ramsdellita, criptomelana, calcofanita e hollandita.

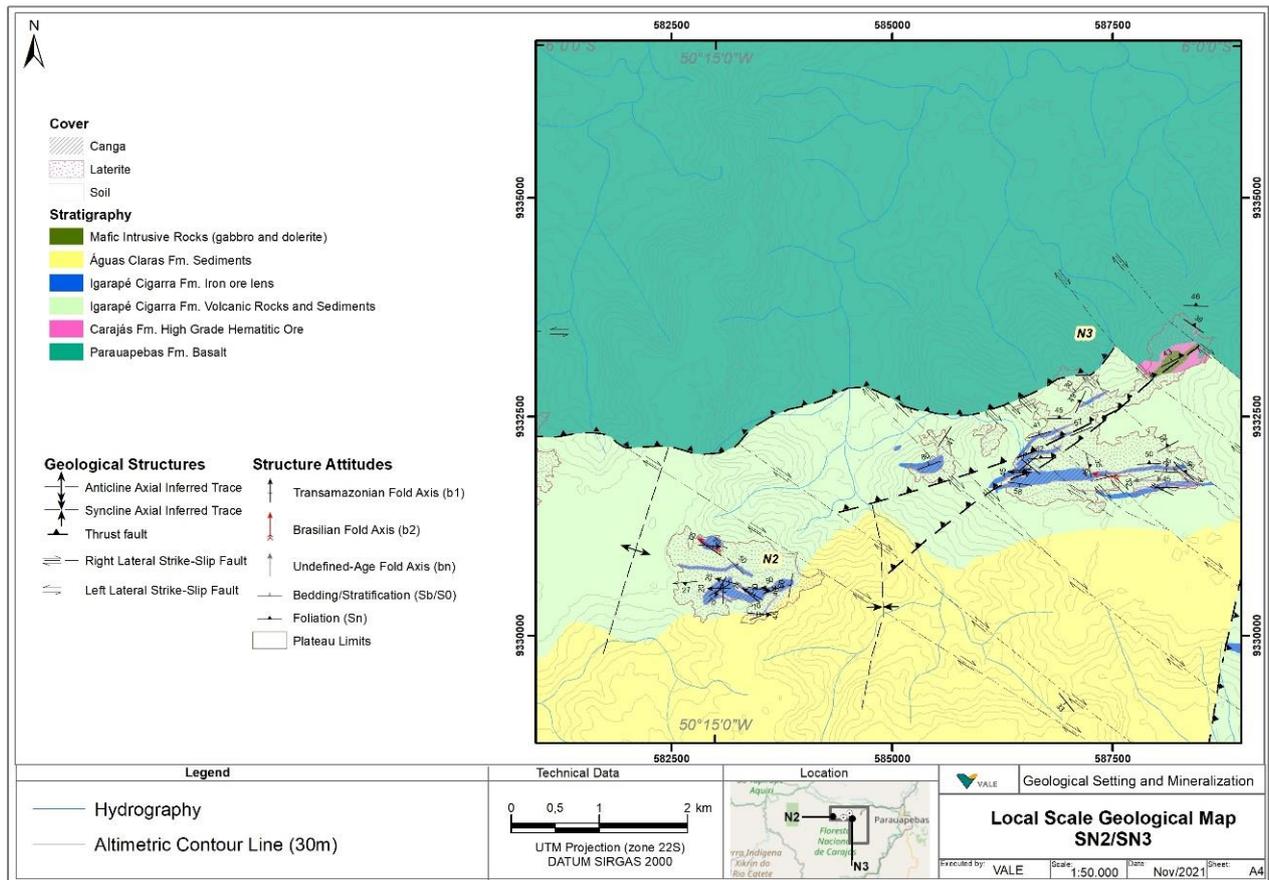
A canga estruturada (CE) compreende 15% da mineralização e constitui crosta superficial com até 10 m de espessura, formada por processos intempéricos diretamente sobre os tipos mineralizados descritos acima. Possui teor médio de 64,10% Fe, densidade média de 3,32 g/cm³, bandamento evidente, coloração cinza escuro avermelhado e é composto por proporções variáveis de goethita, limonita, hematita, magnetita e martita.

Embora o jaspilito (JP) não constitua um tipo mineralizado em Carajás, ele será descrito aqui, pois relaciona-se geneticamente à mineralização, com a qual faz contatos transicional e gradacional, dado pelo aumento no teor de ferro, localmente brusco, dado pelas discontinuidades estruturais. Ocorre preferencialmente abaixo da zona mineralizada, em alguns casos dentro desta, próximo à superfície, alçado por dobras e falhas, ou decorrente de processos incompletos de alteração. Caracteriza-se por apresentar elevada dureza e baixa porosidade, com bandamento e laminação composicional primários de espessura variando de 0,1-3 cm, teor médio entre 30-45% Fe e densidade média de 2,92 g/cm³. O bandamento é definido pela alternância de leitos de cinza escuro de brilho metálico, compostos por hematita, com magnetita e martita subordinadas, que se intercalam a leitos silicosos branco a vermelho acastanhado, formado por variedades criptocristalinas de quartzo. Em profundidade, são comumente observadas os veios de carbonatos e de hematita, provavelmente associadas a processos hipogênicos.

6.3.2. Platôs N2 e N3

6.3.2.1. Dimensões do depósito

Os depósitos de N2 e N3 estão localizados nos platôs homônimos, com formato alongado na direção E-W, na porção central da Serra Norte (Figura 6-6). O platô de N2 tem dimensões de cerca de 1 km x 1 km, enquanto N3 atinge 3 km x 1,5 km, ambos com elevações entre 650-700 m. As rochas da Formação Igarapé Cigarra, do Grupo Grão Pará são predominantes nesses platôs e fazem contatos ao norte com rochas da Formação Parauapebas e ao sul com rochas da Formação Águas Claras. Em geral, as camadas apresentam mergulho de médio a alto ângulo para o norte, configurando um empilhamento estratigráfico invertido (Figura 6-9).



Legenda:

Cobertura

Canga
Laterita
Solo

Estratigrafia

Rochas Máficas Intrusivas (gabro e dolerite)
Sedimentos da Fm. Águas Claras
Lentes de minério de ferro da Fm. Igarapé Cigarra
Rochas Vulcânicas e Sedimentos da Fm. Igarapé Cigarra
Minério Hematítico de Alto Teor da Fm. Carajás
Basalto da Fm. Parauapebas

Estruturas Geológicas

Traço Inferido Axial Anticlinal
Traço Inferido Axial Sinclinal
Falha de cavalgamento
Falha Direita de Rejeito Direcional Lateral
Falha Esquerda de Rejeito Direcional Lateral

Atitudes Estruturais

Eixo de Dobra Transamazônica (b1)
K Eixo de Dobra Brasileira (b2)
Eixo de Dobra de Idade Indefinida (bn)
Acamamento/Estratificação (Sb/ SO)
Foliação (Sn)
Limites do Platô

Legenda

Hidrografia
Linha de Contorno Altimétrico (30 m)

Dados Técnicos

Projeção UT (zona 22S) DATUM SIRGAS 2000

Localização

Cenário Geológico e Mineralização
Mapa Geológico de Escala Local
Executado por:
Escala:
Data
Folha: Nov/2021

Cover

Canga
Laterite
Soil

Stratigraphy

Mafic Intrusive Rocks (gabbro and dolerite)
Águas Claras Fm. Sediments
Igarapé Cigarra Fm. Iron ore lens
Igarapé Cigarra Fm. Volcanic Rocks and Sediments
Carajás Fm. High Grade Hematitic Ore
Parauapebas Fm. Basalt

Geological Structures

Anticline Axial Inferred Trace
Syncline Axial Inferred Trace
Thrust fault
Right Lateral Strike-Slip Fault
Left Lateral Strike-Slip Fault

Structure Attitudes

Transamazonian Fold Axis (b1)
K Brazilian Fold Axis (b2)
Undefined-Age Fold Axis (bn)
Bedding/Stratification (Sb/SO)
Foliation (Sn)
Plateau Limits

Legend

Hydrography
Altimetric Contour Line (30m)

Technical Data

UT Projection (zone 22S) DATUM SIRGAS 2000

Location

Geological Setting and Mineralization
Local Scale Geological Map
Executed by:
Scale:
Date
Sheet: Nov/2021

Figura 6-9 - Mapa geológico N2 e N3.

6.3.2.2. Litologias

A Formação Parauapebas ocorre na região baixa após a borda norte do platô, onde afloram xistos que provavelmente representam o produto da deformação por falhamentos sobre os clorititos encontrados nas zonas menos deformadas dos platôs maiores.

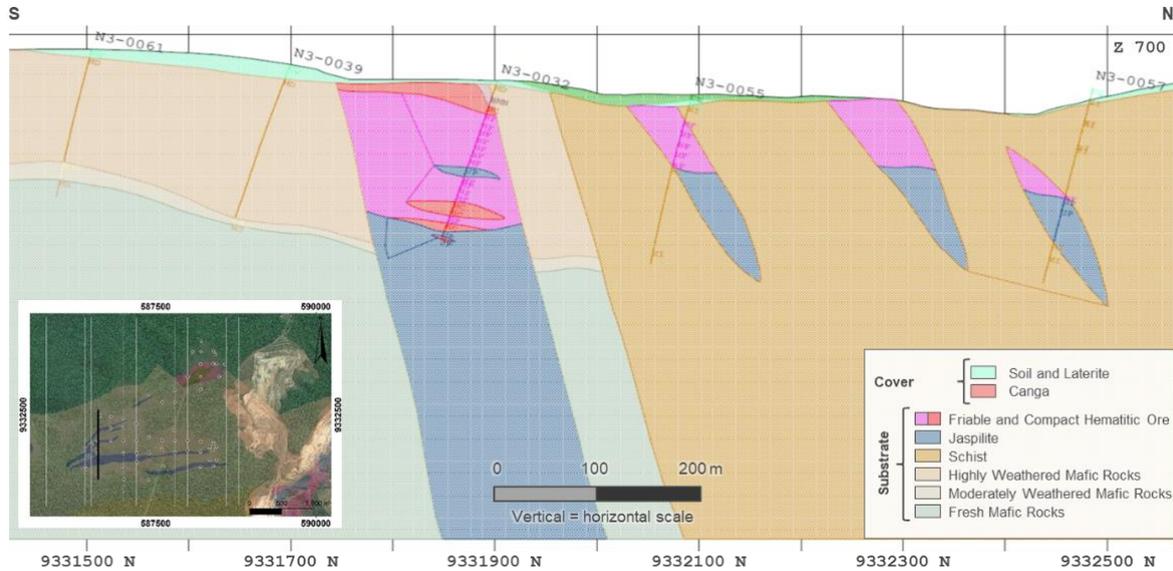
A maior parte das formações ferríferas dos platôs N2 e N3 foi atribuída à Formação Igarapé Cigarra, exceto a porção extrema nordeste de N3, que está correlacionada à Formação Carajás. Em geral, compreendem cerca de 20% da área dos respectivos platôs e não se destacam no relevo devido à espessura baixa.

A Formação Igarapé Cigarra é predominantemente constituída por rochas vulcânicas que se intercalam a lentes de sedimentos químicos e terrígenos subordinados, identificados nos testemunhos de sondagem de N2. Neste platô, as formações ferríferas ocorrem segundo corpos subverticalizados, com espessura em planta variando entre 10-200 m, média de 100 m, enquanto em N3, variam entre 30-250 m, média de 150 m (

Figura 6-10).

O empilhamento estratigráfico nesses platôs é semelhante ao da Formação Igarapé Cigarra em N1, assim como as principais características de suas formações ferríferas. Estas afloram aqui como

corpos lenticulares paralelos e contínuos, modelados como camadas isoladas no empilhamento estratigráfico, para não superestimar o volume de formações ferríferas em profundidade (Figura 6-9). Diferentemente de N1, essas camadas ocorrem em N2 e N3 de forma segmentada, quebradas por várias falhas de transcorrentes e de empurrão, geralmente oblíquas para a direção principal das camadas.



Cobertura

Solo e Laterita
Canga

Substrato

Minério Hematítico Friável e Compacto
Jaspilito
Xisto
Rochas Máficas Altamente Desgastadas
Rochas Máficas Moderadamente Desgastadas
Rochas Máficas Sãs

Cover

Soil and Laterite
Canga

Substrate

Friable and Compact Hematitic Ore
Jaspilite
Schist
Highly Weathered Mafic Rocks
Moderately Weathered Mafic Rocks
Fresh Mafic Rocks

Figura 6-10 - Seção geológica em N3.

6.3.2.3. Estruturas

O mapa geológico da região de N2 e N3 mostra um forte alinhamento das camadas de rocha segundo a direção E-W (Figura 6-9). Os controles estruturais e seu ordenamento cronológico relativo são semelhantes aos descritos para N1, diferenciando-se pela baixa continuidade das formações ferríferas, o que reflete a importância das falhas para o arcabouço geológico local.

Estruturas correlacionadas à tectônica Transamazônica:

- Falha de empurrão de direção E-W com vergência para sul, localizada ao norte dos platôs, no contato entre as rochas da Formação Parauapebas e da Formação Igarapé Cigarra (Figura 6-9). Esta falha marca a omissão das rochas da Formação Carajás, exceto a porção extremo nordeste de N3. As falhas de empurrão com direção NE-SW, vergentes para SE, derivam para a grande falha E-W, constituindo localmente um sistema de falhamentos;
- Embora a repetição das camadas tenha sido interpretada como resultante do empilhamento estratigráfico, esta poderia também pode ser explicada pelo dobramento. A reologia das rochas do domínio da Formação Igarapé Cigarra é muito favorável a este processo, e neste caso, originaria dobras fechadas para isoclinais recumbentes com um eixo segundo a direção NE-SW, vergentes para SE, compatíveis com a tectônica Transamazônica; e

- Sistema de longas falhas transcorrentes dextrais com orientação NW-SE, localizado principalmente no platô N3, responsáveis pela segmentação das formações ferríferas, que se articula ao sistema de de pequenas falhas transcorrentes sinistrais, de orientação NE-SW, na parte central de N2, compatíveis com a tectônica Transamazônica (Figura 6-9).

Estruturas relacionadas à tectônica Brasileira:

- Eixos de dobras abertas, com direção variando de NE-SW a N-S, observados principalmente fora do domínio dos platôs e refletidas como dobras no estilo *kink* nas formações ferríferas.

As formações ferríferas do domínio da Formação Carajás ocorrem restritas ao setor nordeste de N3, de acordo com uma camada tabular subverticalizada, com mergulho pra noroeste, cortada por uma significativa passagem de rocha máfica, associada a uma falha de empurrão (Figura 6-9).

Os sills e diques máficos de composição básica à intermediária com pequena espessura e orientação variável são principalmente observados em testemunhos de sondagem intercalados às formações ferríferas de N2 e N3.

6.3.2.4. Mineralização

A mineralização de N2 e N3 é formada às custas da alteração de jaspilito e tem características muito semelhantes às descritas acima para N1. Por esta razão, será aqui abordado brevemente, enfatizando principalmente seus aspectos exclusivos na área de platôs (Tabela 6-1 e Tabela 6-2).

Tabela 6-1 - características da mineralização em N2

Litotipo	Partição de depósito (%)	Espessura máxima da seção (m)	Teor médio de ferro (%Fe)
Hematita Friável (HF)	84	200	66,26
Canga (CG)	12	30	63,10
Hematita Compacta (HC)	4	45	65,22
Hematita manganésifera (HMN)	< 1	5	61,19

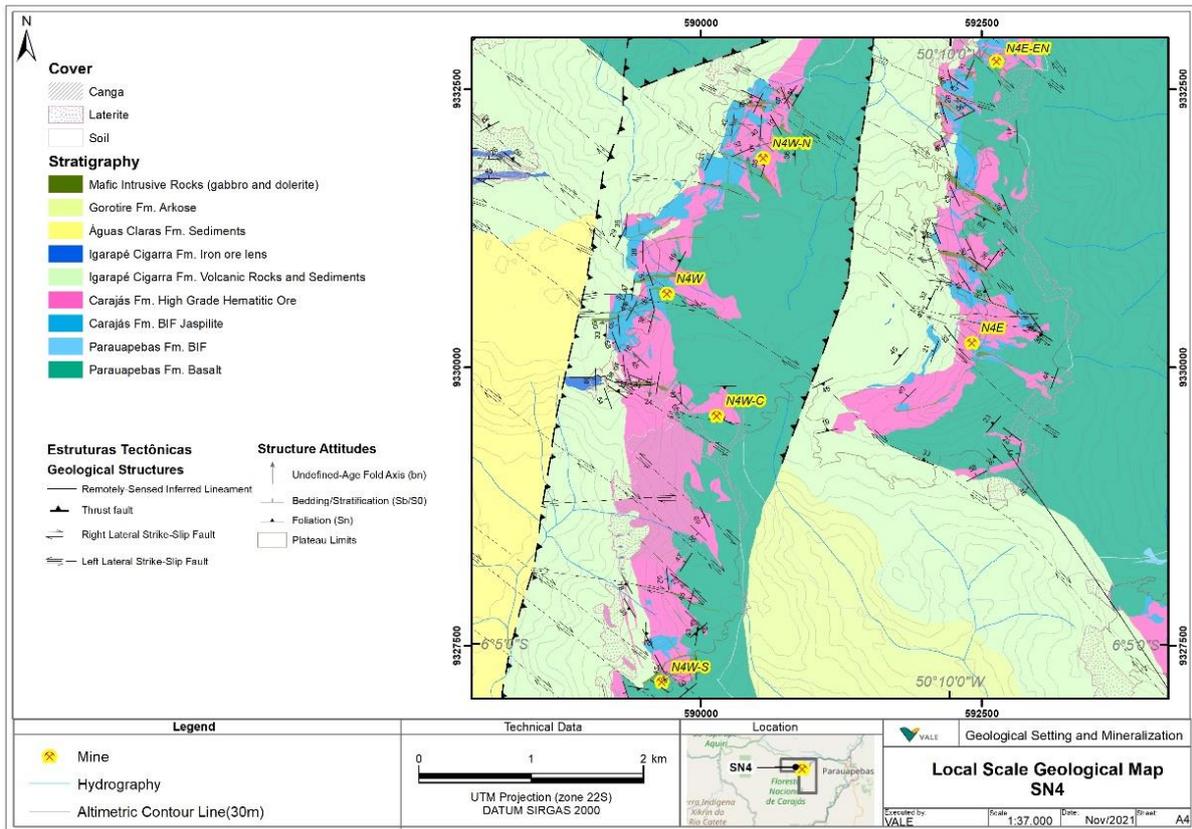
Tabela 6-2 - características da mineralização em N3

Litotipo	Partição de depósito (%)	Espessura máxima da seção (m)	Teor médio de ferro (%Fe)
Hematita Friável (HF)	66	160	66,29
Canga (CG)	24	45	61,60
Hematita Compacta (HC)	10	50	65,73
Hematita manganésifera (HMN)	< 1	1	60,02

6.3.3. Platô N4

6.3.3.1. Dimensões do depósito

A Mina de N4 é subdividida em diversas cavas, denominadas N4WN, N4W, N4WC, N4WS, N4EN e N4E, distribuídas ao longo do platô homônimo, na porção centro-leste da Serra Norte (Figura 6-6). O platô N4 possui grandes dimensões e é composto por rochas das formações Carajás, Parauapebas e Igarapé Cigarra, com forma tabular e mergulho em geral para oeste, configurando um empilhamento estratigráfico normal. Antes mesmo do início da lavra, o platô já encontrava-se dividido nas porções leste e oeste por uma drenagem que separa os dois principais corpos de formações ferríferas. A porção leste tem forma alongada na direção N-S e dimensões de cerca de 8,5 km x 1 km, enquanto a oeste é mais regular, com dimensões de cerca de 4 km x 2 km, ambas com cotas entre 650-750 m (Figura 6-11).



Legenda:

Cobertura

Canga
Laterita
Solo

Estratigrafia

Rochas Máficas Intrusivas (gabro e dolerite)
Arcóseo da Fm. Gorotire
Sedimentos da Fm. Águas Claras
Lentes de minério de ferro da Fm. Igarapé Cigarra
Rochas Vulcânicas e Sedimentos da Fm. Igarapé Cigarra
Minério Hematítico de Alto Teor da Fm. Carajás
Jaspilite BIF da Fm. Carajás
BIF da Fm. Parauapebas
Basalto da Fm. Parauapebas

Estruturas Tectônicas**Estruturas Geológicas**

Lineamento Inferido Detectado Remotamente
Falha de cavalgamento
Falha Direita de Rejeito Direcional Lateral
Falha Esquerda de Rejeito Direcional Lateral

Atitudes Estruturais

Eixo de Dobra de Idade Indefinida (bn)
Acamamento/Estratificação (Sb/ SO)
Foliação (Sn)
Limites do Platô

Legenda

Mina
Hidrografia
Linha de Contorno Altimétrico (30 m)

Dados Técnicos

Projeção UTM (zona 22S) DATUM SIRGAS 2000

Localização

Cenário Geológico e Mineralização
Mapa Geológico de Escala Local SN4
Executado por:
Escala:
Data: Nov/2021
Folha:

Cover

Canga
Laterite
Soil

Stratigraphy

Mafic Intrusive Rocks (gabbro and dolerite)
Gorotire Fm. Arkose
Águas Claras Fm. Sediments
Igarapé Cigarra Fm. Iron ore lens
Igarapé Cigarra Fm. Volcanic Rocks and Sediments
Carajás Fm. High Grade Hematitic Ore
Carajás Fm. BIF Jaspilite
Parauapebas Fm. BIF
Parauapebas Fm. Basalt

Estruturas Tectônicas**Geological Structures**

Remotely Sensed Inferred Lineament
Thrust fault
Right Lateral Strike-Slip Fault
Left Lateral Strike-Slip Fault

Structure Attitudes

Undefined-Age Fold Axis (bn)
Bedding/Stratification (Sb/SO)
Foliation (Sn)
Plateau Limits

Legend

Mine
Hydrography
Altimetric Contour Line(30m)

Technical Data

UTM Projection (zone 22S) DATUM SIRGAS 2000

Location

Geological Setting and Mineralization
Local Scale Geological Map SN4
Executed by:
Scale:
Date: Nov/2021
Sheet:

Figura 6-11 - Mapa geológico N4

6.3.3.2. Litologias

As rochas da Formação Parauapebas predominam na porção leste do platô, sotopostas às rochas da Formação Carajás por contato concordante transicional, mas também ocorrem na porção central, em contato por falha com as rochas da Formação Igarapé Cigarra (Figura 6-11).

A Formação Carajás ocorre de forma contínua na porção central do platô e compreende cerca de 40% da sua área (Figura 6-11). Esta unidade é coincidente com as maiores cotas e corresponde ao domínio de maior potência das formações ferríferas, que são fortemente controladas por falhas transcorrentes e apresentam espessura entre 200-500 metros, em planta (Figura 6-12).

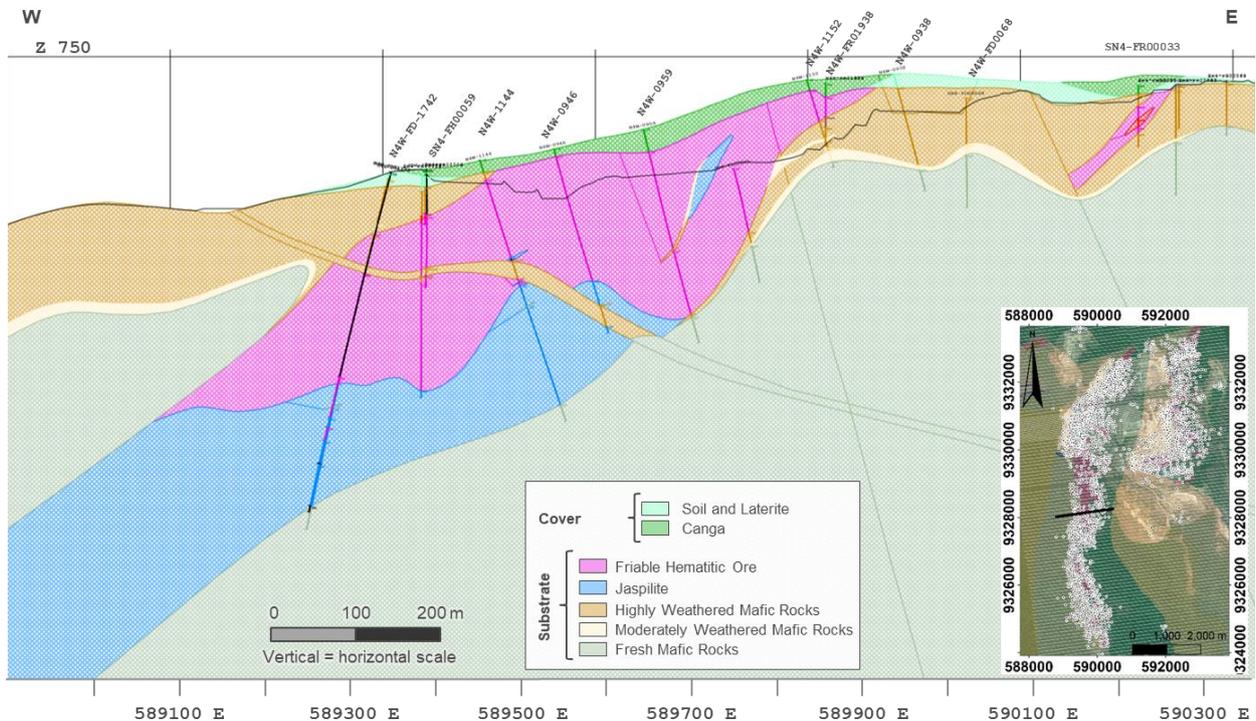
A Formação Igarapé Cigarra sobrepõe a Formação Carajás por contato concordante transicional, aflorando a oeste desta. É constituída por grandes volumes de rochas vulcânicas de caráter bimodal, que se intercalam a pequenas lentes de formações ferríferas, com espessura variando entre 5-100 m (Figura 6-11).

Os sedimentos terrígenos da Formação Águas Claras ocorrem sobrepostos ao domínio da Formação Igarapé Cigarra a leste do limite do platô.

Rochas intrusivas definem corpos de espessura métrica e orientação variável que tendem a acompanhar os planos da falha e cortam todo o pacote do Grupo Grão Pará. Essas rochas apresentam composição básica/intermediária, textura predominantemente fina e fazem contatos

concordantes a discordantes com o acamamento e o bandamento, configurando famílias de sills e diques (Figura 6-12).

Os arcósios da Formação Gorotire são consideravelmente mais jovens e ocorrem limitados por grandes falhas normais, que definem um *grabben*, localizado na porção sul do platô (Figura 6-11).



Cobertura

Solo e Laterita
Canga

Substrato

Minério Hematítico Friável
Jaspilito
Rochas Máficas Altamente Desgastadas
Rochas Máficas Moderadamente Desgastadas
Rochas Máficas Sãs

Cover

Soil and Laterite
Canga

Substrate

Friable Hematitic Ore
Jaspilite
Highly Weathered Mafic Rocks
Moderately Weathered Mafic Rocks
Fresh Mafic Rocks

Figura 6-12 - Seção geológica N4W.

6.3.3.3. Estruturas

No platô de N4, a Formação Carajás assume forte tendência de N-S e define duas faixas de ocorrência denominadas N4W e N4E, com padrão estrutural distinto, separados por uma falha de empurrão vergente para leste (Figura 6-11).

A região de N4W é relativamente mais simples e se comporta como um homoclinal, com camadas de forma geral alinhadas segundo a direção N-S, segmentadas por diversas falhas transcorrentes com direção NW-SE (Figura 6-11 e Figura 6-12).

A região N4E tem maior complexidade, dada a rotação do bandamento, que mergulha para norte na porção sul do depósito, definindo uma dobra que, em planta, toma forma da letra "J," formada pelo arrasto da camada mineralizada ao longo de grandes falhas transcorrentes dextrais (Figura 6-11).

Estruturas correlacionadas à tectônica Transamazônica:

- Falha de empurrão de direção ENE-WSW, com vergência para sul, localizada a norte do platô, no contato entre as rochas da Formação Parauapebas com as das Formações Carajás e Igarapé

Cigarra (Figura 6-10). Esta falha é compatível com o vetor tectônico e necessária para justificar o contato direto entre as rochas das formações Parauapebas e Igarapé Cigarra;

- Sistema de longas falhas transcorrentes dextrais, com orientação NW-SE, que se articula a pequenas falhas transcorrentes dextrais, de orientação E-W, responsáveis pela segmentação das formações ferríferas (Figura 6-11); e
- Dobras abertas com um eixo sub-horizontal na direção E-W observadas principalmente na porção norte do platô.

Estruturas correlacionadas à tectônica Brasileira:

- Falhas de empurrão com direção N-S, vergentes tanto para leste quanto para oeste, que parecem ser o produto da reativação, durante o Brasiliano, de *splays* da Falha de Carajás (?) formada no Transamazônico;
- Reativação de falhas com orientação NW-SE imprimindo a estas cinemática sinistral, principalmente em N4E (Figura 6-10);
- Dobras em estilo *kink* que se formam com variadas escalas de ocorrência e orientações de eixos, presentes principalmente nas formações ferríferas.

6.3.3.4. Mineralização

Como já descrito para os depósitos anteriores, a mineralização de N4 é formada às custas da alteração do jaspilito e será abordada brevemente aqui, com ênfase principalmente nos aspectos exclusivos da área em questão (Tabela 6-3).

Tabela 6-3 - características da mineralização em N4

Litotipo	Partição de depósito (%)	Espessura máxima da seção (m)	Teor médio de ferro (%Fe)
Hematita Friável (HF)	94	350	66,45
Canga (CG)	4	60	63,26
Hematita Compacta (HC)	1	50	64,66
Hematita manganésifera (HMN)	1	60	62,22

6.3.4. Platô N5

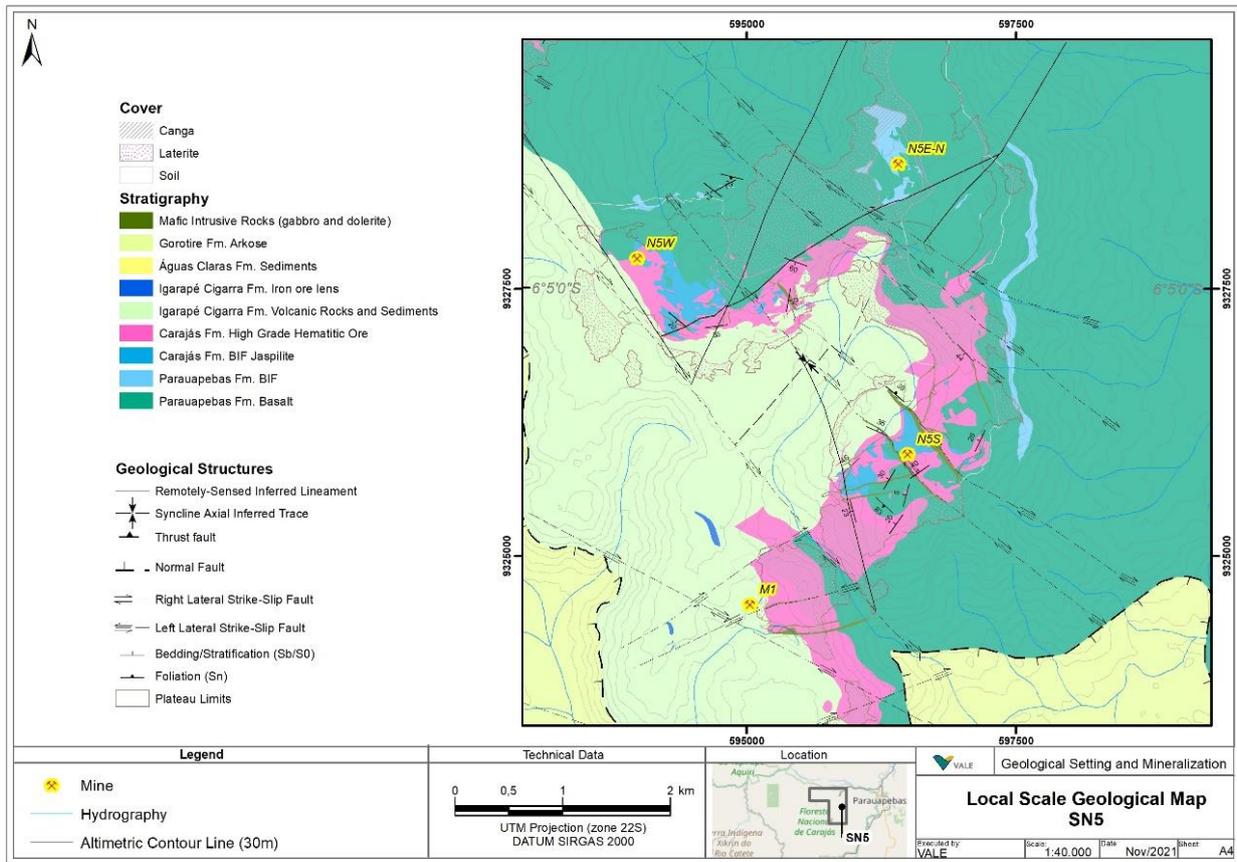
6.3.4.1. Dimensões do depósito

A Mina N5 é subdividida em cinco cavas denominadas como N5W, N5N, N5E, N5S e M1, distribuídas ao longo do platô homônimo, localizado no extremo leste da Serra Norte (Figura 6-6). Este platô tem dimensões de 7 km x 1,5 km, cotas entre 650 m e 800 m, e geometria alongada na direção NNW-SSE, que sofre uma forte curvatura na porção centro-norte, como reflexo da interferência por dobramento. Compreende rochas das formações Parauapebas, Carajás e Igarapé Cigarra, do Grupo Grão Pará. As formações ferríferas ocupam a porção central do platô e fazem contato a leste e norte com as rochas da Formação Parauapebas, e a oeste com as da Formação Igarapé Cigarra. Em geral, as camadas apresentam mergulho geral em torno da direção oeste, configurando um empilhamento estratigráfico normal.

6.3.4.2. Litologias

A Formação Parauapebas foi cartografada nas bordas leste e norte do platô, em contato com a Formação Carajás. Esta corresponde ao domínio de maior potência das formações ferríferas, que se afloram de forma contínua, com espessura entre 100-700 m em planta, na porção central do platô, e compreende cerca de 40% de sua área, coincidente com as maiores cotas e controladas por falhas e dobras (Figura 6-11). A Formação Igarapé Cigarra sobrepõe-se à Formação Carajás por um contato concordante transicional, aflorando a oeste desta. É constituída por grandes

volumes de rochas vulcânicas de caráter bimodal, que se intercalam a pequenas lentes de formações ferríferas, com espessura variando entre 10-60 m (Figura 6-11).



Legenda:

Cobertura

Canga
Laterita
Solo

Estratigrafia

Rochas Máficas Intrusivas (gabro e dolerite)
Arcóseo da Fm. Gorotire
Sedimentos da Fm. Águas Claras
Lentes de minério de ferro da Fm. Igarapé Cigarra
Rochas Vulcânicas e Sedimentos da Fm. Igarapé Cigarra
Minério Hematítico de Alto Teor da Fm. Carajás
Jaspilite BIF da Fm. Carajás
BIF da Fm. Parauapebas
Basalto da Fm. Parauapebas

Estruturas Geológicas

Lineamento Inferido Detectado Remotamente
Traço Inferido Axial Sinclinal
Falha de cavalgamento
Falha Normal
Falha Direita de Rejeito Direcional Lateral
Falha Esquerda de Rejeito Direcional Lateral
Acamamento/Estratificação (Sb/ SO)
Foliação (Sn)
Limites do Platô

Legenda

Mina

Hidrografia

Linha de Contorno Altimétrico (30 m)

Dados Técnicos

Projeção UTM (zona 22S) DATUM SIRGAS 2000

Localização

Cenário Geológico e Mineralização

Mapa Geológico de Escala Local SN5

Executado por:

Escala:

Data: Nov/2021

Folha:

Cover

Canga
Laterite
Soil

Stratigraphy

Mafic Intrusive Rocks (gabbro and dolerite)
Gorotire Fm. Arkose
Águas Claras Fm. Sediments
Igarapé Cigarra Fm. Iron ore lens
Igarapé Cigarra Fm. Volcanic Rocks and Sediments
Carajás Fm. High Grade Hematitic Ore
Carajás Fm. BIF Jaspilite
Parauapebas Fm. BIF
Parauapebas Fm. Basalt

Geological Structures

Remotely-Sensed Inferred Lineament
Syncline Axial Inferred Trace
Thrust fault
Normal Fault
Right Lateral Strike-Slip Fault
Left Lateral Strike-Slip Fault
Bedding/Stratification (Sb/SO)
Foliation (Sn)
Plateau Limits

Legend

Mine

Hydrography

Altimetric Contour Line (30m)

Technical Data

UTM Projection (zone 22S) DATUM SIRGAS 2000

Location

Geological Setting and Mineralization

Local Scale Geological Map SN5

Executed by:

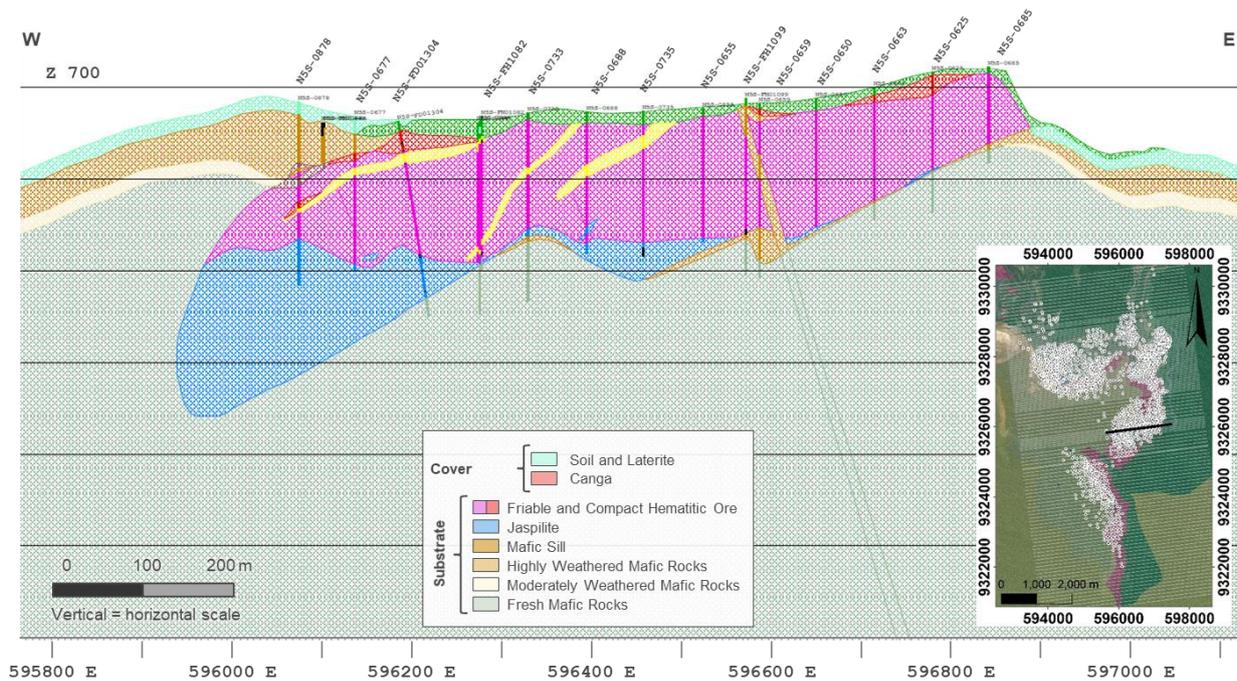
Scale:

Date: Nov/2021

Sheet:

Figura 6-13 - Mapa geológico N5

Rochas intrusivas definem corpos de espessura métrica e orientação variável que tendem a seguir os planos de falha e cortar toda a sequência do Grupo Grão Pará. Essas rochas possuem composição básica/intermediária, textura predominantemente fina e fazem contatos conformáveis a não conformáveis com o acamamento e o bandamento, configurando famílias de *sills* e diques (Figura 6-14). A oeste e a sul do platô predominam os arcósios da Formação Gorotire, que constitui uma unidade consideravelmente mais jovem ocorrendo ao longo de uma fossa tectônica (Figura 6-13).



Cobertura

Solo e Laterita
Canga

Substrato

Minério Hematítico Friável e Compacto
Jaspilite
Soleira Máfica
Rochas Máficas Altamente Desgastadas
Rochas Máficas Moderadamente Desgastadas
Rochas Máficas Sãs

Cover

Soil and Laterite
Canga

Substrate

Friable and Compact Hematitic Ore
Jaspilite
Mafic Sill
Highly Weathered Mafic Rocks
Moderately Weathered Mafic Rocks
Fresh Mafic Rocks

Figura 6-14 - Seção geológica N5S.

6.3.4.3. Estruturas

Em N5, a Formação Carajás se comporta como um homoclinal, com uma tendência variando de NW-SE a N-S e mergulhos para sudeste e leste. O caráter sinuoso na porção norte do platô, é dado em função de um sinclinal que, associada ao sistema de falhas, verificado em todo o platô, controla a geometria da formação ferrífera (Figura 6-13).

Estruturas correlacionadas à tectônica Transamazônica:

- Sistema de falhas transcorrentes dextrais, com orientação NW-SE, que se articula a pequenas falhas transcorrentes dextrais, com orientação E-W, responsável pela segmentação das formações ferríferas (Figura 6-11).

Estruturas correlacionadas à tectônica Brasileira:

- Reativação de parte das falhas de orientação NW-SE, imprimindo a estas cinemática sinistral (Figura 6-13);
- Dobras no estilo *kink* que se formam com variadas escalas de ocorrência e orientações de eixo, presentes principalmente nas formações ferríferas; e
- O Sinclinal de Buriti, com o eixo caindo para SW, não é compatível com o vetor tectônico de nenhum dos eventos. No entanto, esta estrutura está aqui tentativamente correlacionada ao Brasileiro, considerando que a presença do sistema de falhas reativadas pode ter atuado como modificador do campo geral de tensões em escala local.

6.3.4.4. Mineralização

Como já descrito para os depósitos anteriores, a mineralização de N5 é formada às custas da alteração de jaspilito e será abordada brevemente aqui, com ênfase principalmente nos aspectos únicos da área em questão.

Na mina N5, a litologia denominada Ferro Manganês (FMN) ocorre segundo pequenas lentes, com espessura de até 30 m e baixa continuidade lateral, normalmente localizadas próximas ao contato com sills e diques, que sugerem origem hidrotermal. Caracteriza-se como um material hematítico, fracamente magnético, de cor cinza esverdeada, brilho metálico e alta porosidade, que varia de friável a pulverulento. Apresenta baixo teor médio geral de ferro (45,03%), alto teor de Mn (9,28%) e contaminantes, como Al₂O₃ (3,64%), além de perda ao fogo (LOI) de 6,267%.

Tabela 6-4 - características da mineralização em N5

Litotipo	Partição de depósito (%)	Espessura máxima da seção (m)	Teor médio de ferro (%Fe)
Hematita Friável (HF)	83	350	66,69
Canga (CG)	11	60	63,12
Hematita Compacta (HC)	4	50	66,52
Hematita manganésifera (HMN)	2	60	61,01

7. Exploração

7.1. Exploração

7.1.1. Introdução

A exploração mineral começou na década de 70 e ainda está em andamento. Atualmente, a maioria das áreas compreende uma malha de sondagem de 100x100m, 100x50m ou 50x50m dentro das áreas de lavra, com foco em detalhar os corpos de minério e investigar novas áreas potenciais para reclassificação de recursos a serem medidos e indicados. Nas regiões vizinhas, a malha geralmente é espaçada em 200 x 200 m.

7.1.2. Topografia

Os levantamentos topográficos utilizados para modelagem, estimativa de recursos e reservas foram gerados pela composição de levantamentos topográficos detalhados realizados pelas equipes de curto prazo e levantamentos aéreos LiDAR adquiridos sob a supervisão da Vale desde 2006. As equipes de mina priorizam o uso de informações para cobrir todas as áreas operacionais, sendo o aerolaser utilizado para complementar a poligonal de interesse. As topografias estão disponíveis sobre Horizontal Datum SAD69 e Vertical Datum PD04, projetadas em UTM-22S.

7.1.3. Geofísica

As ferramentas geofísicas mais utilizadas na exploração de minerais ferrosos são levantamentos aeromagnéticos, gravimetria aérea FTG, perfilamento geofísico de furos de sondagem por meio de pesquisas de imagens elétricas bidimensionais e gama-gama.

Os levantamentos geofísicos de furos de sondagem foram aplicados sistematicamente desde 2012 nos projetos da Vale. Várias ferramentas de perfilagem geofísica foram usadas com base em técnicas acústicas, elétricas, nucleares e ópticas, dependendo da finalidade, embora a mais comum seja o uso de ferramentas de radiação gama-gama e radiação gama natural. O levantamento é realizado por uma empresa terceirizada, supervisionada pela equipe de geofísicos da Vale, que também é responsável pelo QA/QC dos dados e pela interpretação dos resultados.

As principais anomalias geofísicas detectadas nas áreas de mina são tratadas e selecionadas como alvos de sondagem e mapeamento geológico. Além disso, parte dos furos mais recentes foi perfilada pelo método gama-gama.

7.1.4. Interpretação da pessoa qualificada das informações de exploração

O Complexo Serra Norte tem sido amplamente explorado desde a década de 70, e um grande banco de dados foi desenvolvido como resultado das atividades de exploração e de lavra. O principal método de exploração é a sondagem testemunhada e a coleta de ensaios. No entanto, o progresso na geofísica melhorou a quantidade e a qualidade dos dados que podem ser utilizados para interpretações geológicas e modelagem geológica.

7.1.5. Potencial de exploração

Trabalhos adicionais são necessários para determinar o potencial de exploração abaixo das atuais operações de lavra a céu aberto e novos alvos identificados a partir de anomalias geofísicas ou de mapeamento, principalmente associadas a hematitas friáveis e compactas. No entanto, os dados disponíveis até agora confirmam a grande continuidade dos corpos de formação de ferro tanto em superfície quanto em profundidade, o que mostra expectativas positivas quanto ao potencial exploratório desta área.

7.2. Sondagem

7.2.1. Visão Geral

A exploração da Serra Norte começou no final da década de 60 e continuou até o início da década de 70. Nessa época, foi realizada uma grande campanha de exploração, abrangendo toda a Província Mineral de Carajás. O projeto incluiu as áreas da Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e São Félix do Xingu, todas com grande potencial de recursos geológicos de minério de ferro. Atualmente, este trabalho é coordenado pela Gerência de Geologia e Sondagem Ferrosos.

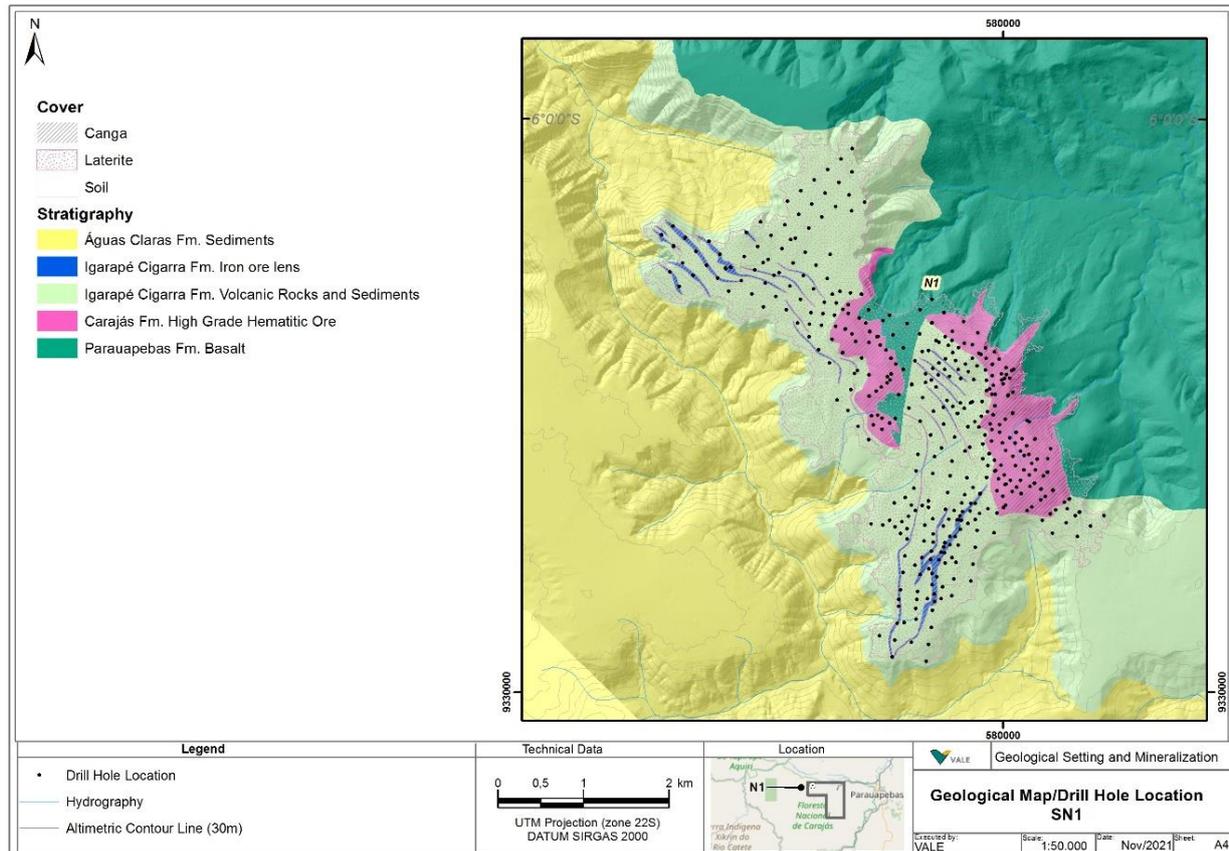
7.2.2. Sondagem na propriedade

Campanhas de sondagem de longo prazo na Serra Norte foram realizadas em vários períodos, com os primeiros registros a partir da década de 1960. Em geral, as malhas de sondagem possuem espaçamentos de 200x200 em projeção horizontal em todos os depósitos e fechamentos da Serra Norte de 100x100m, 100x50m ou 50x50m em grades irregulares, principalmente nas áreas de mineração de N4 e N5. A Tabela 7-1 mostra um resumo das campanhas de sondagem realizadas nos depósitos da Serra Norte e Figura 7-1 a Figura 7-5 apresentam a distribuição espacial dessas campanhas de sondagem em cada depósito.

Tabela 7-1 - Distribuição das campanhas de sondagem ao longo dos anos em todos os depósitos da Serra Norte.

Depósito	Ano	Metros
N1	1968-1971	3.760
	2001-2004	3.475
	2005	29.259
	2006-2007	13.554
	2012-2013	6.735
	Total	56.783
N2	1970	516
	2002	1.893
	2012	5.055
	2013	1.938
	Total	9.401
N3	1970	483
	2002-2009	3.861
	2010-2011	13.222
	2018	10.814
	2019	5.589
	Total	33.969
N4	1970-1979	21.271
	1991-1999	45.171
	2000-2009	191.453
	2010-2014	83.945
	2015-2018	43.597
	Total	385.437
N5	1971	5.138
	1993-1999	20.683
	2000-2009	125.271

	2010-2014	77.265
	2015-2017	22.590
	Total	250.948
TOTAL		736.537



Legenda:

Cobertura

Canga
Laterita
Solo

Estratigrafia

Sedimentos da Fm. Águas Claras
Lentes de minério de ferro da Fm. Igarapé Cigarra
Rochas Vulcânicas e Sedimentos da Fm. Igarapé Cigarra
Minério Hematítico de Alto Teor da Fm. Carajás
Basalto da Fm. Parauapebas

Legenda

Localização do Furo de Sondagem
Hidrografia
Linha de Contorno Altimétrico (30 m)

Dados Técnicos

Projeção UTM (zona 22S) DATUM SIRGAS 2000

Localização

Cenário Geológico e Mineralização
Localização do Furo de Sondagem/Mapa Geológico SN1
Executado por:
Escala:
Data: Nov/2021

Cover

Canga
Laterite
Soil

Stratigraphy

Águas Claras Fm. Sediments
Igarapé Cigarra Fm. Iron ore lens
Igarapé Cigarra Fm. Volcanic Rocks and Sediments
Carajás Fm. High Grade Hematitic Ore
Parauapebas Fm. Basalt

Legend

Drill Hole Location
Hydrography
Altimetric Contour Line (30m)

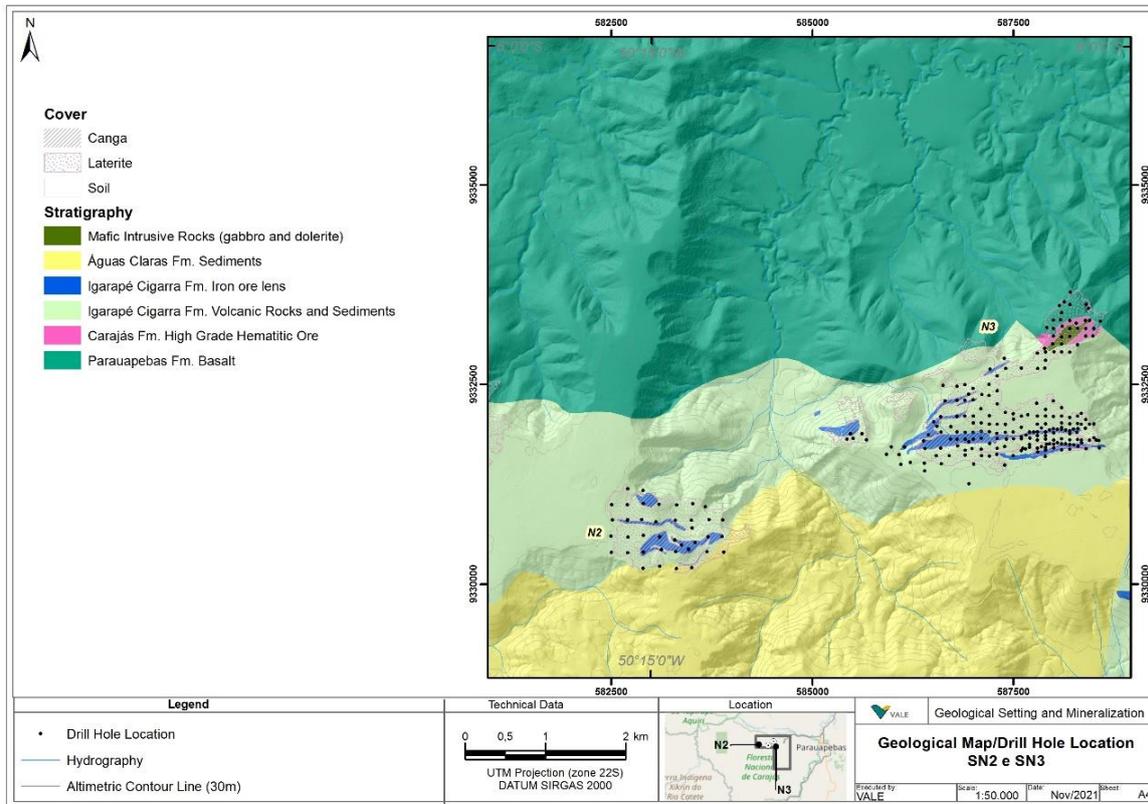
Technical Data

UTM Projection (zone 22S) DATUM SIRGAS 2000

Location

Geological Setting and Mineralization
Geological Map/Drill Hole Location SN1
Executed by:
Scale:
Date: Nov/2021

Figura 7-1 - Distribuição espacial da sondagem geológica a longo prazo no depósito N1.



Legenda:

Cobertura

Canga
Laterita
Solo

Estratigrafia

Rochas Máficas Intrusivas (gabro e dolerite)
Sedimentos da Fm. Águas Claras
Lentes de minério de ferro da Fm. Igarapé Cigarra
Rochas Vulcânicas e Sedimentos da Fm. Igarapé Cigarra
Minério Hematítico de Alto Teor da Fm. Carajás
Basalto da Fm. Parauapebas

Legenda

Localização do Furo de Sondagem
Hidrografia
Linha de Contorno Altimétrico (30 m)

Dados Técnicos

Projeção UT (zona 22S) DATUM SIRGAS 2000

Localização

Cenário Geológico e Mineralização
Localização do Furo de Sondagem/Mapa Geológico SN2 SN3
Executado por:
Escala:
Data: Nov/2021
Folha:

Cover

Canga
Laterite
Soil

Stratigraphy

Mafic Intrusive Rocks (gabbro and dolerite)
Águas Claras Fm. Sediments
Igarapé Cigarra Fm. Iron ore lens
Igarapé Cigarra Fm. Volcanic Rocks and Sediments
Carajás Fm. High Grade Hematitic Ore
Parauapebas Fm. Basalt

Legend

Drill Hole Location
Hydrography
Altimetric Contour Line (30m)

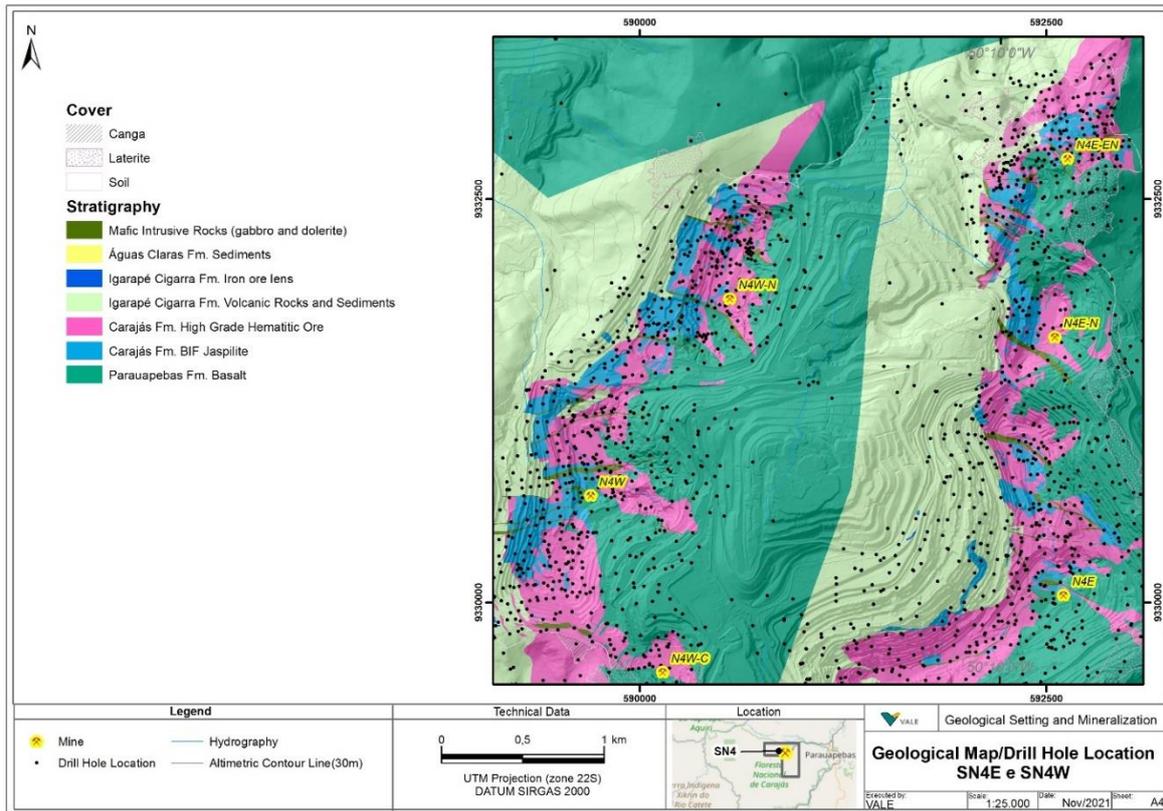
Technical Data

UT Projection (zone 22S) DATUM SIRGAS 2000

Location

Geological Setting and Mineralization
Geological Map/Drill Hole Location SN2 e SN3
Executed by:
Scale:
Date: Nov/2021
Sheet:

Figura 7-2 - Distribuição espacial da sondagem geológica de longo prazo nos depósitos de N2 e N3.



Legenda:

Cobertura

Canga
Laterita
Solo

Estratigrafia

Rochas Máficas Intrusivas (gabro e dolerite)
Sedimentos da Fm. Águas Claras
Lentes de minério de ferro da Fm. Igarapé Cigarra
Lentes de minério de ferro Rochas Vulcânicas e Sedimentos
Fm. Carajás Minério Hematítico de Alto Teor
Fm. Carajás BIF Jaspilite
Fm. Parauapebas Basalto

Legenda

Mina
Localização do Furo de Sondagem
Hidrografia
Linha de Contorno Altimétrico (30 m)

Dados Técnicos

Projeção UTM (zona 22S) DATUM SIRGAS 2000

Localização

Cenário Geológico e Mineralização

Localização do Furo de Sondagem/Mapa Geológico SN4E SN4W
Executado por:
Escala:
Data: Nov/2021
Folha:

Cover

Canga
Laterite
Soil

Stratigraphy

Mafic Intrusive Rocks (gabbro and dolerite)
Águas Claras Fm. Sediments
Igarapé Cigarra Fm. Iron ore lens
Igarapé Cigarra Fm. Volcanic Rocks and Sediments
Carajás Fm. High Grade Hematitic Ore
Carajás Fm. BIF Jaspilite
Parauapebas Fm. Basalt

Legend

Mine
Drill Hole Location
Hydrography
Altimetric Contour Line (30m)

Technical Data

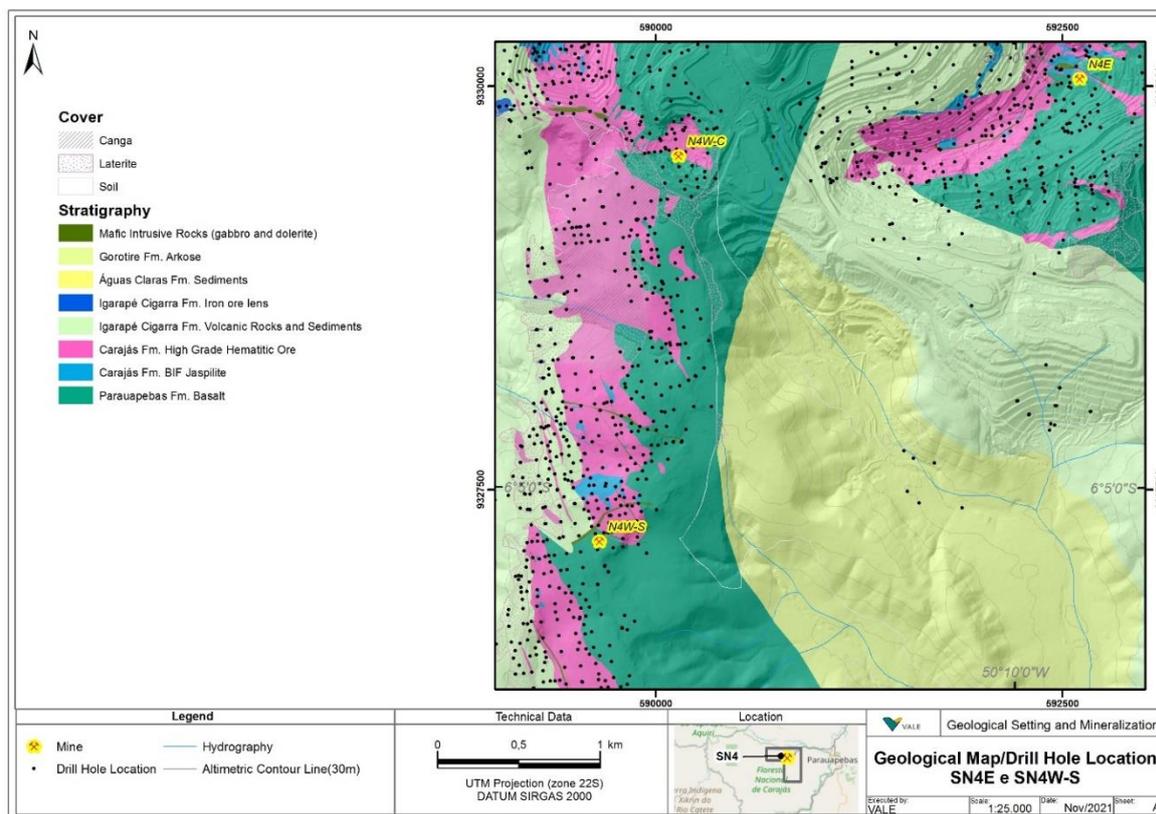
UTM Projection (zone 22S) DATUM SIRGAS 2000

Location

Geological Setting and Mineralization

Geological Map/Drill Hole Location SN4E e SN4W
Executed by:
Scale:
Date: Nov/2021
Sheet:

Figura 7-3 - Distribuição espacial da perfuração geológica de longo prazo nos depósitos de N4E e N4W.



Legenda:

Cobertura
Canga
Laterita
Solo

Estratigrafia
Rochas Máficas Intrusivas (gabro e dolerite)
Arcóseo da Fm. Gorotire
Sedimentos da Fm. Águas Claras
Lentes de minério de ferro da Fm. Igarapé Cigarra
Rochas Vulcânicas e Sedimentos da Fm. Igarapé Cigarra
Minério Hematítico de Alto Teor
Jaspilite BIF da Fm. Carajás
Basalto da Fm. Parauapebas

Legenda
Mina
Localização do Furo de Sondagem
Hidrografia
Linha de Contorno Altimétrico (30 m)

Dados Técnicos
Projeção UTM (zona 22S)
DATUM SIRGAS 2000

Localização

Cenário Geológico e Mineralização
Localização do Furo de Sondagem/Mapa Geológico SN4E SN4W-S
Executado por:
Escala:
Data: Nov/2021
Folha:

Cover
Canga
Laterite
Soil

Stratigraphy
Mafic Intrusive Rocks (gabro and dolerite)
Gorotire Fm. Arkose
Águas Claras Fm. Sediments
Igarapé Cigarra Fm. Iron ore lens
Igarapé Cigarra Fm. Volcanic Rocks and Sediments
Carajás Fm. High Grade Hematitic Ore
Carajás Fm. BIF Jaspilite
Parauapebas Fm. Basalt

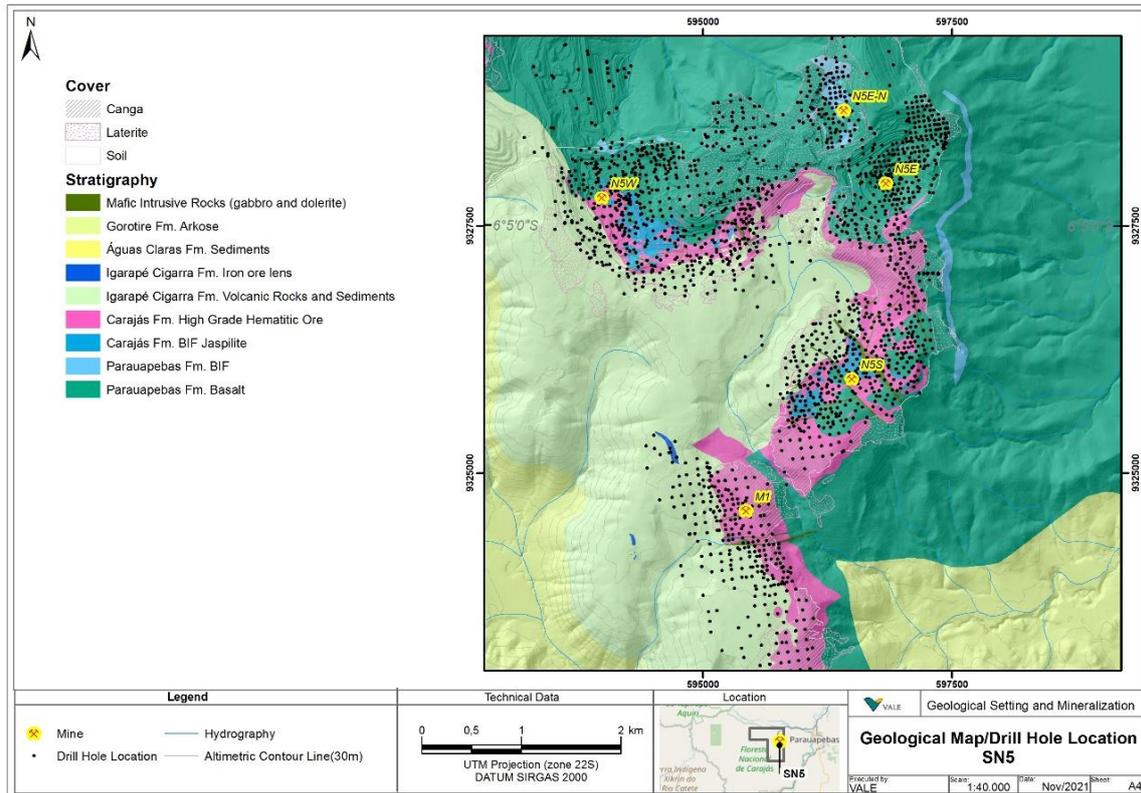
Legend
Mine
Drill Hole Location
Hydrography
Altimetric Contour Line(30m)

Technical Data
UTM Projection (zone 22S)
DATUM SIRGAS 2000

Location

Geological Setting and Mineralization
Geological Map/Drill Hole Location SN4E e SN4W-S
Executed by:
Scale:
Date: Nov/2021
Sheet:

Figura 7-4 - Distribuição espacial da perfuração geológica de longo prazo na porção sul dos depósitos de N4E e N4W.



Cobertura

Canga
Laterita
Solo

Estratigrafia

Rochas Máficas Intrusivas (gabro e dolerite)
Arcóseo da Fm. Gorotire
Sedimentos da Fm. Águas Claras
Lentes de minério de ferro da Fm. Igarapé Cigarra
Rochas Vulcânicas e Sedimentos da Fm. Igarapé Cigarra
Minério Hematítico de Alto Teor
Jaspilite BIF da Fm. Carajás
BIF da Fm. Parauapebas
Basalto da Fm. Parauapebas

Legenda

Mina
Localização do Furo de Sondagem
Hidrografia
Linha de Contorno Altimétrico (30 m)

Dados Técnicos

Projeção UT (zona 22S)
DATUM SIRGAS 2000

Localização

Cenário Geológico e Mineralização
Localização do Furo de Sondagem/Mapa Geológico SN5
Executado por:
Escala:
Data: Nov/2021
Folha:

Cover

Canga
Laterite
Soil

Stratigraphy

Mafic Intrusive Rocks (gabro and dolerite)
Gorotire Fm. Arkose
Águas Claras Fm. Sediments
Igarapé Cigarra Fm. Iron ore lens
Igarapé Cigarra Fm. Volcanic Rocks and Sediments
Carajás Fm. High Grade Hematitic Ore
Carajás Fm. BIF Jaspilite
Parauapebas Fm. BIF
Parauapebas Fm. Basalt

Legend

Mine
Drill Hole Location
Hydrography
Altimetric Contour Line(30m)

Technical Data

UT Projection (zone 22S)
DATUM SIRGAS 2000

Location

Geological Setting and Mineralization
Geological Map/Drill Hole Location SN5
Executed by:
Scale:
Date: Nov/2021
Sheet:

Figura 7-5 - Distribuição espacial da perfuração geológica de longo prazo no depósito de N5.

7.2.3. Sondagem excluída para fins de estimativa

Os furos de sondagem que apresentaram inconsistências durante o processo de validação do banco de dados foram corrigidos no banco de dados ou excluídos da estimativa de recursos. Mais discussões sobre este item são apresentadas no processo de regularização de amostras para estimativas de teores e classificação de recursos no Capítulo 11 (Estimativas de Recursos Minerais).

7.2.4. Métodos de sondagem

O tipo de sondagem é uma broca diamantada rotativa convencional e a maioria dos furos de sondagem são verticais a sub-verticais. Os diâmetros de sondagem são variáveis ao longo do tempo entre HW (76,2 mm), HQ (63,5 mm) ou mesmo NW (54,7 mm), NQ (47,3 mm), BW (42 mm) e BQ (36,4 mm). Os dois últimos diâmetros são adotados apenas em algumas situações devido a questões operacionais.

7.2.5. Registro

Nos depósitos de Serra Norte, a descrição geológica dos furos sondados entre 1968 e 1972 foi registrada no relatório de pesquisa elaborado ao final da campanha. Desde 1991, a perfilagem de testemunhos foi feita em cadernos de campo e a partir de 2003, realizada diretamente em mídia digital. Além da perfilagem geológica, descrições geotécnicas também foram realizadas em vários furos, utilizando uma planilha padrão, na qual foram descritas características macroscópicas, como grau de alteração, consistência, tipo de descontinuidade, rugosidade, tipo de preenchimento e RQD (Designação de Qualidade da Rocha), entre outros. Para todos esses itens, havia códigos padronizados para preenchimento da planilha. Também havia um campo descritivo para observações relevantes.

Desde 2012, são usados os padrões de descrição definidos pela Gerência de Geologia e Sondagem Ferrosos. O procedimento para todas as áreas da Serra Norte estipula amostragem padrão de 15 m para projetos brownfield e minas em Carajás, e 10 m para áreas de exploração. Este suporte de amostra pode variar 50% para o comprimento mínimo e 10% para o comprimento máximo. Neste caso, o comprimento mínimo pode ser de 7,5 m e o máximo de 16,5 m para áreas de lavra. A coleta é feita no lado esquerdo da caixa, ao longo de seu comprimento, mantendo os 50% restantes nas caixas de testemunho. Os materiais friáveis são coletados com auxílio de uma pá de metal com dimensões padronizadas, de acordo com o diâmetro do furo e materiais compactos, como hematita compacta (HC), jaspilite (JP) e rochas máficas inalteradas (MS), são cortados longitudinalmente usando uma serra diamantada.

Atualmente, a maioria dos furos de sondagem é armazenada no Galpão Serra Norte, localizada na mina N5.

7.2.6. Recuperação

A recuperação do testemunho é boa em todos os depósitos do Complexo Serra Norte. A recuperação média do testemunho dos furos de sondagem é de cerca de 90%. As áreas de recuperação insatisfatória normalmente são limitadas a zonas de falha e cisalhamento. Os furos de sondagem abaixo de 50% de recuperação são excluídos do banco de dados.

7.2.7. Levantamentos das bocas dos furos

Os dados das coordenadas do furo de sondagem são obtidos por meio de levantamentos topográficos e armazenados no Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Geológico. Atualmente, esses dados são coletados sobre Datum Horizontal SAD69 e Datum Vertical PD4, projetados em UTM-22S.

7.2.8. Levantamentos de desvio

Foram utilizados diferentes equipamentos de levantamento, como os giroscópios Maxibor I, Maxibor II, Deviflex e Reflex. O levantamento também foi realizado com equipamentos Tropari; no entanto, os dados não foram utilizados na modelagem geológica devido à interferência do magnetismo da formação de ferro.

7.2.9. Comentários sobre interpretação e resultados materiais

A sondagem e o levantamento foram realizados de acordo com as práticas padrão da indústria no momento em que a sondagem foi realizada e fornecem cobertura adequada das zonas de mineralização de minério de ferro. Geralmente, os métodos de levantamento da boca dos furos e desvio usados fornecem locais de amostra confiáveis. Os métodos de sondagem fornecem boa recuperação do testemunho. Os procedimentos de registro fornecem consistência nas descrições.

Esses dados foram adequados para a estimativa de recursos minerais e reserva mineral. Não há fatores de sondagem ou recuperação de testemunho na sondagem para suportar as estimativas conhecidas do PQ que possam afetar materialmente a acurácia e a confiabilidade dos resultados.

7.3. Hidrogeologia

7.3.1. Visão Geral

A caracterização hidrogeológica começa principalmente durante a fase de campanha de exploração, observando e reunindo informações geológicas e de águas subterrâneas, que servirão de base para estudos desenvolvidos durante todas as fases de uma mina.

Nesta fase, o programa de monitoramento é implementado e composto por medidores pluviométricos, piezômetros, indicadores de nível de água e medidores de fluxo instalados em nascentes, córregos e rios. Neste estágio, um programa de pré-desaguamento é estabelecido se necessário, e todos os dados de monitoramento serão usados para definir metas de rebaixamento.

Para a construção do modelo hidrogeológico, foi utilizado o banco de dados de 2015 disponível para minas N4 e N5, o de 2018 para minas N1 e N2 e o de 2021 para mina N3. Um programa completo de QA/QC da Vale para o banco de dados hidrogeológico está em desenvolvimento. Atualmente, os dados são analisados pela Vale e enviados aos consultores responsáveis pela construção dos modelos hidrogeológicos, que fazem uma validação de verificação cruzada de todos os dados utilizados como entrada.

A demanda por água neste complexo de mineração é fornecida por fontes subterrâneas e de superfície. A água de superfície é coletada na barragem do Igarapé Gelado e usada como água bruta para o processo industrial da planta de processamento de minério de ferro. A água subterrânea é coletada através de perfurações tubulares profundas nas minas N4 e N5, sendo destinada ao uso industrial, abastecimento de WTP, despoeiramento de estradas, reabastecimento de água nos córregos Jacaré e Buriti. O restante destina-se às barragens de Pêra e Gelado.

7.3.2. Parâmetros

De acordo com Beale & Read (2013), os testes laboratoriais são o método mais preciso de determinação dos parâmetros de fluxo de água; no entanto, há a desvantagem de que as amostras usadas podem não ser representativas e podem ser perturbadas durante a amostragem, transporte e manuseio. Por esse motivo, nas minas da Vale, os testes de múltiplos furos em campo e comparação com a literatura foram utilizados preferencialmente para determinar os principais parâmetros do aquífero (transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento).

7.3.3. Modelo de água subterrânea

Os modelos hidrogeológicos são ferramentas utilizadas para representar a dinâmica das águas subterrâneas de forma simplificada e possibilitar a simulação de diferentes cenários. Os principais

objetivos desses modelos são estimar as taxas de fluxo, a disponibilidade de água e fornecer dados de nível de água que serão usados como contribuição para a análise de estabilidade geotécnica.

O desaguamento é feito bombeando poços e/ou túneis de desaguamento localizados na formação ferrífera, o que também corresponde ao aquífero principal. As despressurizações de taludes são realizadas por poços de bombeamento, furos horizontais de drenagem e descarga natural.

Para construir o modelo hidrogeológico, as seguintes etapas foram seguidas:

- **Compilação de dados:** Compilação, verificação e análise de dados preexistentes de monitoramento hidrogeológico: nível freático, precipitação pluviométrica, medidor de fluxo, além das informações geológicas.
- **Modelo conceitual hidrogeológico:** Interpretação dos dados compilados em um modelo que servirá de "esboço" para o modelo numérico, contendo as unidades hidrogeológicas, superfície potenciométrica, zonas de recarga, zonas de descarga e poços de bombeamento.
- **Preparação do modelo numérico:** A partir do modelo conceitual, os dados são inseridos no software de modelagem (Visual MODFLOW ou FEFLOW), onde as equações de fluxo e os cálculos de balanço de massa serão resolvidos.
- **Calibração do modelo numérico (permanente/transitório):** A calibração consiste em comparar as cabeças hidráulicas calculadas com as observadas nos instrumentos de monitoramento (indicadores de nível de água e piezômetros). Os parâmetros de entrada hidrodinâmica são modificados por um fator denominado nRMS (Raiz Quadrada Média Normalizada), que funciona como um indicador de confiança. O melhor fator atinge um valor inferior a 10% ($nRMS < 10\%$), bem como a avaliação do balanço de massa (entradas/saídas) das condições-limite utilizadas no modelo. Os modelos foram calibrados para garantir a confiança entre os dados monitorados e calculados.

O banco de dados utilizado para construir os dados do modelo foi considerado satisfatório para atingir o objetivo principal, pois o modelo foi calibrado, e para as minas do complexo Serra Norte, é mostrado na Tabela 7-2 que resume as principais informações e as variáveis consideradas nos estágios de análise, considerando os resultados dos fluxos simulados também para o rebaixamento máximo das minas.

Tabela 7 2 - Resumo das condições gerais utilizadas e dos resultados das simulações numéricas

Empresa Contratada	Cava	Ano do modelo calibrado	Software	nRMS (%)	Taxa de fluxo de drenagem (m³/h)	Número de instrumentos considerados na calibração
HIDROVIA	N1	2018	FEFLOW	2,32	670	16
HIDROVIA	N2	2018	FEFLOW	2,32	164	16
MDGEO	N3	2021	Visual MODFLOW	9,84	539,6	5
MDGEO	N4W e N4E	2015	Visual MODFLOW	1,80	2.636	24
MDGEO	N5	2015	Visual MODFLOW	2,50	1.490	12

7.3.4. Comentário sobre os resultados

Os dados monitorados foram considerados satisfatórios para atingir o objetivo principal, que é construir, calibrar e simular futuros cenários de lavra em um modelo numérico de águas subterrâneas.

A Vale está atualmente melhorando sua rede de monitoramento de água subterrânea e o programa de QA/QC está em desenvolvimento, o que aumentará a confiança nos dados e modelos numéricos.

A opinião do Profissional Qualificado é que a análise do banco de dados e os procedimentos de controle de qualidade são suficientes para fornecer dados confiáveis para apoiar a estimativa de recursos minerais e reservas minerais.

7.4. Geotecnia

7.4.1. Visão Geral

As informações geotécnicas são constituídas de experiência anterior em minas mais próximas e dados obtidos durante o estágio inicial. As avaliações geotécnicas são complementadas por dados obtidos durante as atividades de mineração.

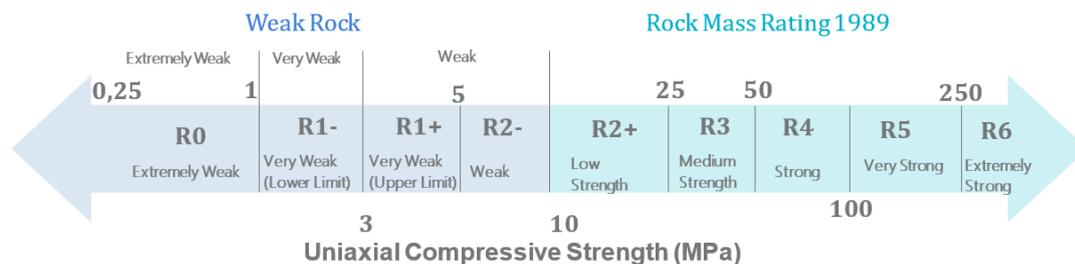
A descrição geotécnica de testemunho e o mapeamento geotécnico da mina são os principais métodos de coleta de dados. A perfilagem de testemunhos segue um procedimento interno (PRO-030016 rev0) que define as etapas a serem seguidas para a descrição geotécnica, essencial para obter a individualização e caracterização adequadas dos intervalos geotécnicos. Para mapeamento do local, os dados geológicos, geotécnicos e estruturais descritos são usados para definir os domínios geotécnicos. O mapeamento estrutural é obtido a partir do mapeamento geológico de superfície regional e local e da interpretação do furo de sondagem.

As principais estruturas com potencial desencadeador de falhas são juntas, acamamento e foliações pervasivas. Os domínios estruturais e suas respectivas estereonetes foram utilizados para análise cinemática e interpretação do mecanismo de falha.

Para descrição de testemunhos ou mapeamento, os dados coletados seguem as tabelas propostas pela ISRM (1997), Bieniawski (1989) e Martin & Stacey (2018) ajustadas pela Vale (2019) para se ajustarem aos depósitos de formação ferrífera. Os parâmetros geotécnicos descritos são resistência à compressão, intemperismo, grau de fraturamento, RQD, tipo de descontinuidade, ângulo alfa de descontinuidade principal, principais condições de descontinuidade (abertura, rugosidade, espaçamento, alteração de parede, preenchimento, tipo e espessura de parede). Esses parâmetros de caracterização são aplicados para definir diferentes sistemas de classificação de maciços rochosos usados nas minas da Vale.

As minas a céu aberto da Vale são compostas principalmente por rochas fracas e friáveis. Para classificar essas rochas, é utilizada a Classificação de Rochas Frágeis apresentada por Martin & Stacey (2018), aplicada a materiais cuja resistência à compressão uniaxial é inferior a 10 MPa, equivalente à faixa de resistência à compressão abaixo de R2- (Figura 7-6). Rochas com resistência à compressão igual ou superior a R2+ são classificadas de acordo com RMR (1989).

A classificação GSI também é usada e obtida através de correlação empírica com o valor RMR proposto por Hoek (2001), onde $GSI = RMR - 5$. Para algumas minas, onde essa correlação foi testada, é possível ter um valor empírico diferente e, em alguns casos, o GSI é obtido a partir do mapeamento GSI superficial do local da mina.



Legenda:

Rocha Frágil				Classificação de Maciços Rochosos 1989				
Extremamente Frágil	Muito Frágil	Frágil						
Extremamente Frágil	Muito Frágil (Limite Inferior)	Muito Frágil (Limite Superior)	Frágil	Baixa Resistência	Média Resistência	Forte	Muito Forte	Extremamente Forte
Força Compressiva Uniaxial (MPa)								
Weak Rock				Rock Mass Rating 1989				
Extremely Weak	Very Weak	Weak						
Extremely Weak	Very Weak (Lower Limit)	Very Weak (Upper Limit)	Weak	Low Strength	Medium Strength	Strong	Very Strong	Extremely Strong
Uniaxial Compressive Strength (MPa)								

Figura 7-6 - Classificações de RMR e Rocha Frágil em função da resistência dos materiais (Modificadas de Martin & Stacey (2018).

A caracterização estrutural típica consiste em descrever e definir conjuntos de juntas (incluindo acamamento e foliação), falhas, zonas de cisalhamento e diques através de mapeamento estrutural. O uso de sondagem geofísica (levantamentos de telespectadores, resistividade elétrica e método sônico) ainda está no estágio de testes e implementação na Vale para determinar intervalos e parâmetros geotécnicos, como razão de Poisson, módulo de Young, porosidade total, densidade de massa e direção de inclinação de estruturas.

Os modelos geomecânicos de todas as minas localizadas no Complexo de Mina Serra Norte foram construídos com cerca de 476.300 m de sondagem geotécnica e 12.363 pontos de mapeamento superficial geotécnico. Esses bancos de dados foram elaborados e/ou validados por consultores independentes.

Amostras para testes geotécnicos (alterados e inalterados) são obtidas a partir de testemunhos de perfuração e in situ (superfície de minas). Os métodos de amostragem seguem critérios internos que garantem a qualidade, controle e representatividade da amostra.

Inspeções visuais de rotina no local e monitoramento feitos pela equipe geotécnica interna para identificar anomalias geotécnicas, como fissuras por tensão, problemas com ineficiência na drenagem superficial, detonação e sobrecavação, risco de queda de rocha ou qualquer recurso que possa prejudicar a estabilidade do talude são realizados para garantir o controle contínuo da segurança operacional. Todas as não conformidades identificadas são registradas e encaminhadas para o responsável pela solução operacional por meio de um sistema interno.

A utilização de sistemas integrados de monitoramento com prismas (TDR), indicadores de nível de água, piezômetros, inclinômetros, extensômetros, medidor de fissura, radar terrestre e radares orbitais apoiados por inspeções visuais de rotina garante alarmes precoces e monitoramento contínuo 24/7 para taludes específicos controlados por um centro de monitoramento adequado.

O modelo hidrológico é usado para promover o desaguamento superficial de poços operacionais. O Plano Mestre de Drenagem de Superfície foi elaborado para controle e direção da água superficial da água da chuva e desaguamento. Orienta as equipes de planejamento e operação no projeto do sistema de drenagem nas cavas.

O objetivo do sistema de drenagem da mina é a recuperação e reutilização da água da mina nas operações de lavra para processamento de minérios, transporte de materiais, uso operacional (por exemplo, supressão de poeira) e proteção ambiental, especificamente relacionadas aos impactos da água de mineração em recursos de águas superficiais e subterrâneas. A água de escoamento fora do local também pode ser desviada da mina e das instalações de resíduos para reduzir o volume de água a ser tratado.

Os requisitos regulamentares locais estipulam a qualidade da descarga da água da mina ou cargas de poluentes de descarga associadas. O tratamento de drenagem da mina pode ser um componente do gerenciamento geral da água da mina para apoiar uma operação de mineração durante toda a vida útil da mina e melhorar o pós-fechamento e o uso sustentável da propriedade da mina muito tempo após o esgotamento do depósito de minério.

7.4.2. Determinações de Parâmetros

Os parâmetros de elasticidade e de resistência usados são obtidos a partir de testes geotécnicos diretos, que normalmente incluem: testes de cisalhamento triaxial (CU, CD e célula Hoek), teste de cisalhamento direto, UCS (Resistência de Compressão Não Confinada), ensaio de tração brasileiro, velocidades de ondas P e S, bem como métodos indiretos, como o Martelo Schmidt e PLT (Teste de Carga Pontual). Os testes geotécnicos diretos são realizados por vários laboratórios privados e instituições públicas, que seguem as normas internacionais e nacionais de execução e, em geral, possuem certificação ISO 9001. Os principais testes utilizam as metodologias estabelecidas em: ASTM D4767, ASTM D7181, ASTM D5407, ASTM D7012, ASTM D3080, ASTM D4543, ASTM D3967, ASTM D4428, ASTM D5873 e ASTM D5731.

Os métodos indiretos e testes tátil visuais, baseados em martelos geológicos ou outros elementos para avaliação de resistência, são aplicáveis durante o mapeamento ou na descrição de testemunhos de sondagem (ISRM, 1997) e são realizados pela equipe geotécnica interna em armazéns para armazenamento e descrição de testemunhos de sondagem e seguem os padrões descritos em procedimentos internos (PRO-030030 rev1). Para rochas frágeis (resistência à compressão abaixo ou igual a R2-), o envelope de resistência Mohr Coulomb foi obtido a partir de testes geotécnicos existentes. Os materiais com anisotropia de resistência foram testados em diferentes direções (paralela, perpendicular e oblíqua). As propriedades de resistência de rochas duras (resistência à compressão acima ou igual a R2+) foram obtidas diretamente por meio de testes geotécnicos laboratoriais e os parâmetros do maciço rochoso foram obtidos de acordo com o critério generalizado de Hoek-Brown (Hoek, 2001).

As propriedades de descontinuidade foram obtidas por meio de testes de cisalhamento direto, em que a resistência máxima (resistência à escolha) ocorre na própria superfície de descontinuidade. Além disso, a partir dos dados de mapeamento de superfície e sondagem, foram obtidas descrições do testemunho, segundo os critérios de Barton e Bandis (1990), definindo parâmetros de JRC (Coeficiente de Rugosidade da Junta) e JCS (Resistência à Compressão da Junta). Para os litotipos sem testes na mina avaliada, foram utilizados os parâmetros obtidos para as minas próximas com contextos litoestratigráficos, tectônicos e geomecânicos semelhantes.

7.4.3. Análise de estabilidade do talude

As análises de estabilidade de taludes bidimensionais (2D) foram feitas pelo Método do Equilíbrio Limite (ELM), usando o software Slide2®, desenvolvido pela Rocscience Inc., para avaliar potenciais falhas não circulares e/ou circulares, considerando os modelos geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos mais reais, possíveis mecanismos de falha e parâmetros de resistência. Essas análises foram feitas ao longo de toda a cava, com base nas seções representativas que podem influenciar as instabilidades (seções críticas), avaliando principalmente as falhas de escala do talude geral e inter-rampa. As análises em escala de bancada foram feitas por meio de análises cinemáticas e análise específica. Com base na análise feita, foram definidos os ângulos de bancada, inter-rampa e geral para projetar a cava.

Além disso, o lençol freático utilizado foi apoiado por simulações finais de rebaixamento de cava a partir dos modelos hidrogeológicos.

Em geral, o projeto de taludes de cava final sem interferências próximas à mina pode atingir o Fator de Segurança (FoS) determinístico igual ou superior a 1,3. No entanto, o projeto de taludes de cava final com interferências próximas à mina (estradas externas, pilhas de estéril, ferrovia, bairros e outros) deve ser dimensionado para atingir FoS igual ou superior a 1,5. As especificidades dos critérios de aceitação foram baseadas em referências internacionais e boas práticas sugeridas por Read & Stacey (2009), conforme apresentado na Tabela 7-2.

Tabela 7-2 - Valores típicos dos critérios de aceitação de FoS. Fonte: Modificada de Read & Stacey (2009)

Escala de Talude	Consequências da Falha	Critérios de Aceitação ^a	
		FoS _(min) (estático)	FoS _(min) (dinâmico)
Bancada	Baixa-alta ^b	1,1	NA
Inter-rampa	Baixo	1,15–1,2	1,0
	Moderado	1,2	1,0
	Alto	1,2–1,3	1,1
Geral	Baixo	1,2–1,3	1,0
	Moderado	1,3	1,05
	Alto	1,3–1,5	1,1

^a Precisa atender a todos os critérios de aceitação.
^b Semi-quantitativamente avaliado.

Como o Brasil está localizado em uma região intracratônica, não se espera a ocorrência de terremotos de alta magnitude, mas a atividade sísmica no Brasil é conhecida e monitorada internamente (a Vale possui um conjunto de sismográficos instalados em várias minas que contribuem para essa rede sismográfica nacional) e por institutos externos. Estudos sísmicos locais para as regiões do Quadrilátero Ferrífero e Carajás estão em desenvolvimento. Por esta razão, foram adotadas acelerações sísmicas teóricas.

As análises de estabilidade de taludes pseudo-estáticas (dinâmicas) que consideram os efeitos de terremotos foram feitas basicamente para o pós-fechamento da mina. Nas avaliações operacionais e de curto prazo, a sismicidade não é considerada devido à baixa incidência e aos baixos níveis dos terremotos. Além disso, para pós-fechamento da mina foi considerada a recuperação do nível de água até os níveis originais (nível pré-lavra). Em geral, o fator de segurança esperado deve atender à suposição de segurança $FoS \geq 1,1$, conforme estabelecido em 2009 por Stacey & Read (Tabela 7-2).

7.4.4. Garantia de qualidade e controle de qualidade

Um programa completo de QA/QC da Vale para a descrição de sondagem geotécnica está em desenvolvimento. Atualmente, as técnicas de validação cruzada utilizadas foram baseadas principalmente em três correlações empíricas. A primeira validação cruzada para formações ferríferas correlaciona o teste do britador da Vale com as estimativas de resistência à compressão de rocha. A segunda correlaciona a resistência à compressão estimada com o grau de desagregação para cada material. O terceiro critério consiste na relação entre o grau de fratura, RQD e espaçamento da junta.

Os resultados dos testes laboratoriais de elasticidade e resistência foram validados pela equipe geotécnica da Vale ou empresas fornecedoras independentes. Amostras com resultados inconsistentes e/ou inconclusivos foram descartadas.

Amostras duplicadas foram exigidas, quando erros de avaliação foram identificados. Além disso, amostras duplicadas são enviadas para diferentes laboratórios, mas não há um programa de controle estabelecido rotineiramente ou mesmo auditorias externas para avaliar os equipamentos e os resultados dos testes para garantir que todas as informações e recomendações sejam consistentes. Sobre o assunto, a Vale vem montando um laboratório geotécnico interno de rochas e solos, seguindo o padrão internacional desde 2019. Este laboratório será utilizado para realizar auditorias e verificação periódica de rotina nos laboratórios privados e públicos utilizados pela Vale.

Na verdade, a garantia de qualidade passa a exigir a calibração regular dos equipamentos por laboratórios terceirizados e equipamentos próprios (de acordo com os critérios especificados para cada um deles). Os contratos com os laboratórios seguem critérios e padrões internacionais de garantia de qualidade para o resultado entregue, incorporando ações a serem tomadas caso os resultados dos testes não atendam às especificações exigidas. Esses sistemas de verificação ainda não são implementados como obrigatórios; no entanto, incluem verificações ocasionais no transporte, armazenamento, testes e apresentação de resultados, visando proteção contra danos físicos, qualidade e controle das amostras testadas, incluindo informações sobre tipos de teste, quantidade de testes e medidas de avaliação.

7.4.5. Comentário sobre os resultados

Uma combinação de dados históricos, próximos à mina e dados geotécnicos atuais, com a experiência do local de lavra de equipes internas apoiadas por consultores nacionais e internacionais, é usada para estabelecer diretrizes e procedimentos internos no projeto e operação de minas a céu aberto da Vale com base nos padrões internacionais e melhores práticas. Métodos analíticos são usados para avaliar o comportamento da rocha intacta, do maciço rochoso e influenciar a estrutura geológica.

Atualmente, a Vale está aprimorando seus testes laboratoriais e investigação de sondagem em rochas residuais para apoiar melhor os modelos geotécnicos e a análise de estabilidade do talude, e o programa de QA/QC está em desenvolvimento, o que aumentará a confiança nos dados e modelos numéricos.

A opinião do Profissional Qualificado é que a preparação da amostra, análise, controle de qualidade e procedimentos de segurança são suficientes para fornecer dados confiáveis para apoiar a estimativa de recursos minerais e reservas minerais.

8. Preparação de amostras, análises e segurança

8.1. Visão Geral

O processo de governança da Vale suporta a aquisição de dados confiáveis para a estimativa de Recursos Minerais e Reserva Mineral. Cada operação possui protocolos documentados e controles internos para procedimentos de sondagem, amostragem, preparação de amostras e análises químicas aprovados pelo Grupo de Gerenciamento de Recursos da Vale. A documentação dos protocolos é mantida atualizada e o pessoal recebe treinamento adequado para aplicá-los. Todos os dados são devidamente identificados por números de referência exclusivos para que as informações do furo de sondagem possam ser restauradas de forma confiável a partir da boca do furo independente, levantamento de desvio, geologia, propriedades físicas e tabelas de ensaio. Todos os dados são verificados antes da entrada no banco de dados. As práticas de amostragem e as metodologias de análises químicas são claramente descritas e suportadas. A proficiência e as capacidades técnicas das instalações de preparação e análises químicas de amostras são confirmadas por revisões periódicas e/ou auditorias. O banco de dados contém todas as informações relevantes para a estimativa de Recursos Minerais e Reserva Mineral. O banco de dados usado na estimativa contém dados imparciais e representativos, e quaisquer problemas importantes identificados pelos programas de QA/QC têm ações corretivas apropriadas aplicadas e divulgadas.

8.2. Métodos de amostragem

As amostras de testemunho de sondagem são coletadas em galpões da Vale, com planos de amostragem preparados por geólogos logo após a descrição e a coleta realizadas pelos assistentes técnicos, geralmente de empresas contratadas. Entre 1960 e 1979, preparação física e ensaios químicos foram realizados internamente em laboratórios localizados na Serra Norte (área N1) e Belo Horizonte, Minas Gerais. Em 1989, o laboratório da VALE foi inaugurado na mina N4E, atualmente pertencente à Gerência de Desenvolvimento de Processos e Laboratórios – Norte Ferrosos. O laboratório realiza atividades de preparação física e análise química de amostras de exploração e produção de minério de ferro e manganês. Entre agosto de 2008 e meados de agosto de 2009, as amostras de exploração geológica foram preparadas em um laboratório terceirizado da empresa SGS Geosol Laboratório Ltda., localizado na cidade de Parauapebas, no estado do Pará. Entre meados de agosto de 2009 e abril de 2013, as amostras foram preparadas pela empresa Intertek do Brasil Inspeções Ltda. no laboratório de preparação física da GAMIK/VALE, localizado na mina N5, posteriormente utilizando o laboratório na cidade de Parauapebas. O trabalho de preparação física terceirizado para SGS Geosol e Intertek foi realizado sob supervisão da VALE (Gerência de Laboratórios). Desde abril de 2013, as amostras começaram a ser preparadas no laboratório da VALE, localizado na mina N4 (Gestão do Norte Ferroso de Desenvolvimento de Processos e Laboratórios), onde ensaios químicos também são realizados.

Durante as diferentes campanhas de sondagem realizadas nos depósitos da Serra Norte, as amostras foram analisadas em diferentes fluxogramas analíticos. As principais diferenças entre os fluxos analíticos são o número de frações de tamanho das partículas, o número de frações de tamanho com análise química e os analitos medidos, além do tipo de peneiramento (seco ou úmido). Desde meados de novembro de 2008, foi realizada uma revisão geral dos fluxos de preparação física das amostras de geologia e foi definido um novo fluxograma padrão, que está em uso até agora. Neste fluxo, várias peneiras são usadas (alívio da carga no processo de peneiramento), mas apenas cinco frações granulométricas são geradas, resultantes da composição de massa das várias peneiras. Para as cinco frações geradas (+19 mm, -19+8 mm, -8+1 mm, -1+0,15 mm e -0,15 mm), as alíquotas são obtidas para ensaios químicos. O peneiramento é feito em processo seco.

Para o trabalho de modelagem, um único arquivo foi gerado com as amostras agrupadas em faixas de tamanho de partículas: G1: +8 mm; G2: -8+0,15 mm e G3: -0,15 mm, com G1 e G2, sendo subdivididos em G1A: +19 mm, G1B: -19+8 mm, G2A: -8+1 mm e G2B: -1 mm+0,15 mm. As faixas G2A e G2B têm resultados de massa, mas não têm ensaios químicos. O banco de dados do modelo

geológico de longo prazo contém os resultados para os seguintes analitos: Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, LOI, CaO, MgO, TiO₂, FeO, K₂O e Cu. O banco de dados de curto prazo contém os analitos Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, LOI, CaO, MgO e TiO₂.

8.3. Métodos de segurança da amostra

8.3.1. Garantia de qualidade e controle de qualidade

Os dados históricos de QA/QC, anteriores a 2012, relativos a amostras de controle, amostras gêmeas, duplicatas de campo, duplicatas de material britado, duplicatas de material pulverizado, duplicatas e padrões externos não revelaram pontos de atenção (em frequência e/ou magnitude) quanto à precisão e exatidão (de amostragem e análises químicas) que comprometem os bancos de dados utilizados para fins de modelagem geológica e estimativa de recursos, classificação de recursos e reservas de áreas e minas nos Complexos Serra Norte e Serra Sul da Província Mineral de Carajás.

Os dados atuais de QA/QC, desde 2012 armazenados no Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Geológico (GDMS), mostram que, no período de 2012 a julho de 2019, o Laboratório Carajás processou amostras de exploração geológica, geologia de curto e longo prazo de acordo com os fluxos analíticos de química e química global por partições granulométricas das áreas da Serra Sul e Serra Norte.

Análises para Al₂O₃, Fe, Mn, P, LOI e SiO₂ seguem o padrão PTP-000915 da Vale Versão 02 de 08/08/2019 e referem-se às seguintes quantidades: 1.640 duplicatas de material britado, 3.380 duplicatas de polpa e 1.938 amostras de 7 tipos de padrões.

Também foram realizados testes entre diferentes laboratórios da Vale (Carajás, Alegria e Timbopeba) e laboratórios externos (Intertek e SGS Geosol). Foram avaliados os resultados de 470 duplicatas externas relacionadas aos seguintes interlaboratórios: Carajás x Alegria (179 duplicatas), Carajás x Intertek (54 duplicatas), Carajás x SGS Geosol (105 duplicatas) e Carajás x Timbopeba (132 duplicatas).

A última avaliação de QA/QC do laboratório foi realizada em abril de 2019 pelo pessoal da Vale. Em geral, o desempenho do laboratório é classificado como satisfatório (resultados em conformidade ≥ 90% ou muito próximos a 90%) e/ou admissível (resultados em conformidade + aceitáveis ≥ 90% ou muito próximos a 90%). Na maioria dos casos, as precisões dos ensaios de amostragem/químicos são boas e as falhas/enviesamentos analíticos são pequenos ou insignificantes em comparação com as faixas de teor envolvidas.

Para o Fe, o desempenho técnico do laboratório é satisfatório e considerado aceitável. Para contaminantes, o desempenho técnico variou de satisfatório a insatisfatório (há alguns pontos de atenção em teores mais baixos). As duplicatas de material britado e as duplicatas de polpa DP mostram maiores porcentagens de resultados não conformes e maiores imprecisões relativas médias (embora ainda aceitáveis), provavelmente influenciadas pela maior frequência de teores mais baixos para os analitos Al₂O₃, Mn, P, LOI e SiO₂.

Duplicatas externas testadas no laboratório Intertek indicam uma pequena tendência de superestimação em teores mais baixos (enviesamentos ainda aceitáveis e conservadores) para o analito P. Duplicatas externas testadas no laboratório SGS Geosol indicam uma ligeira tendência de superestimação e subestimação em níveis mais baixos (enviesamentos ainda aceitáveis) para P (enviesamentos conservadores) e LOI (enviesamentos não conservadores), respectivamente.

As amostras de controle padrão indicam uma tendência de pequena superestimação em teores muito baixos para Al₂O₃, Mn e P. Os pontos de atenção mais importantes estão em investigação pela equipe de geologia e laboratório.

Inspeções laboratoriais de rotina são feitas para verificar a organização e o armazenamento, equipamento (balanças, fornos, peneiras, britadores, moinhos/pulverizadores, separadores), procedimentos operacionais e registros relacionados ao programa interno de QA/QC. Os dados de QA/QC revelaram indicadores gerais de não conformidade, precisão e exatidão considerados satisfatórios, não comprometendo o banco de dados relacionado a eles.

8.3.2. Sistema de gestão de banco de dados

As principais informações do banco de dados de furos de sondagem de curto e longo prazo, bem como furos geotécnicos, são organizadas em três tabelas: Header, Survey e Assay.

Os dados básicos incluídos na tabela Header são a identificação do furo, coordenadas leste e norte, elevação, profundidade, recuperação em porcentagem, data de conclusão do furo, DATUM e se o furo foi perfilado ou não.

Para a tabela Survey, além da identificação do furo, há informações sobre azimute, mergulho e profundidade do furo.

A tabela Assay é composta pelos seguintes dados: identificação do furo, código da amostra, intervalos de/para, comprimento da amostra, litologia da amostra, química global dos diferentes analitos, faixas granulométricas correspondentes ao fluxograma, química por faixa dos diferentes analitos, fechamento granulométrico, fechamento químico, recuperação de amostras em porcentagem, identificação do fluxograma analítico utilizado, data em que os resultados foram disponibilizados pelo laboratório e tipo de amostra.

8.3.3. Validações da tabela Header

Os itens abaixo descrevem as validações feitas na tabela Header nas sondagens geotécnicas e de longo e curto prazo do banco de dados de Serra Norte.

Validação de Furos com Topografia

Validação da posição dos furos, verificando a existência de conflitos de posicionamento em relação às topografias originais e atuais. Todos os furos que apresentaram diferenças superiores a 10 m foram verificados. Alguns furos foram identificados com elevação acima da topografia original ou abaixo da topografia atual, mas essas diferenças não correspondem a erros, pois esses furos estão localizados em áreas de aterro.

Validação de Novos Furos no Banco de Dados

Essa verificação é feita comparando o banco de dados do modelo anterior com o atual. Assim, é possível verificar a diferença na profundidade total dos dois bancos de dados e identificar os novos furos.

Validação da Recuperação da Sondagem

Para esta verificação, foi considerada a coluna de recuperação, criando uma fórmula para indicar os furos com recuperação abaixo de 50%. Furos com baixa recuperação foram descartados.

Validação de Coordenadas Duplicadas

Esta validação visa identificar furos com as mesmas coordenadas Leste e/ou Norte. Furos com coordenadas idênticas foram descartados ou houve uso parcial dos dados. Isso pode ocorrer em casos de furos interrompidos por problemas operacionais que tiveram que ser perfurados novamente posteriormente.

Validação DATUM

Esta validação visa garantir que todos os dados de posição do furo estejam no mesmo Sistema de Coordenadas e Datum. A Vale definiu o Datum Horizontal SAD69 e Datum Vertical PD04 projetados em UTM-22S para Serra Norte.

Validação de Coordenadas

Nesta validação, as coordenadas dos arquivos originais da planilha de Monitoramento do Levantamento são comparadas com as coordenadas obtidas do Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Geológico. Nenhum erro foi encontrado.

8.3.4. Validações da tabela Survey

A aquisição da tabela Survey foi feita extraindo os dados do GDMS, os arquivos de descrição originais e os dados validados da tabela Header obtidos do GDMS. Os itens abaixo descrevem as validações realizadas na tabela Survey do banco de dados do modelo Serra Norte.

Validação Geral do Perfil

A verificação geral do perfil é feita após a elaboração da planilha Survey com todos os dados necessários, a saber: Furo, Profundidade (Prof.), Azimute (Azim) e Mergulho (Dip). Normalmente, os dados de desvio de trajetória são necessários para cobrir pelo menos 85% do comprimento total do furo. As verificações envolvem diferenças de Azimute, diferenças de Inclinação, se o furo foi perfilado ou não, o tipo de faixa e a verificação geral da diferença entre as leituras subsequentes. Esta última é a verificação dos intervalos cuja diferença de inclinação ou azimute é maior ou igual a 1,4º/m.

Header x Validação de Profundidade - Survey

Nesta validação, a profundidade final da tabela Header em relação à profundidade final da tabela Survey é verificada.

Validação do Mergulho e Azimute x Planilha de Acompanhamento de Sondagem

Esta validação refere-se à comparação dos valores de Mergulho e Azimute utilizados na modelagem em relação aos valores originais nas planilhas de Monitoramento de Levantamento (dados considerados oficiais).

Validação de Consistência de Mergulho e Azimute

O objetivo desta validação é verificar se os furos com Azimute igual a 0 são verticais e vice-versa. Deve haver azimute para furos que não sejam verticais. Também podemos verificar os valores mínimo e máximo de mergulho e azimute. É importante que o mergulho seja sempre negativo.

8.3.5. Validações da tabela Assay

Os itens abaixo descrevem as validações realizadas na tabela Assay do banco de dados da Serra Norte.

Validação de Amostra Duplicada

Esta validação serve para identificar a presença de amostras duplicadas no banco de dados. Nenhum erro deste tipo foi encontrado.

Validação de Lacuna_(gap) e Sobreposição

Esta é uma das principais verificações no banco de dados. Serve para identificar a disposição correta dos intervalos, considerando o intervalo "De" e "Para". Esta validação visa destacar erros de Lacuna (intervalos com comprimento ausente) ou Sobreposição (intervalos com comprimento sobreposto). A verificação é feita diretamente cruzando as informações "De" e "Para". Nenhum erro foi encontrado.

Validação do Conteúdo Global Calculado

Esta validação visa verificar os valores químicos globais de todos os analitos calculados nas amostras com análise de tamanho e intervalo de partículas. Este cálculo é feito através de uma média ponderada do teor em massa nas faixas granulométricas, utilizando a fórmula:

$$GL = (Fe1A*G1A+Fe1B*G1B+Fe2A*G2A+Fe2B*G2B+Fe3*G3)/(G1A+G1B+G2A+G2B+G3)$$

Nenhum erro foi encontrado nos cálculos de grau global.

Validação de Valores Anômalos

A verificação de valores anômalos consiste em verificar se os valores máximo e mínimo são coerentes com cada elemento analisado. É possível, por exemplo, destacar as alterações da coluna (P e Al₂O₃, por exemplo). No banco de dados, não pode haver valores de produtos químicos iguais a 0, o mínimo deve ser sempre o limite de detecção. Também é possível detectar valores negativos. Nenhum valor inconsistente foi encontrado nesta verificação.

Granulometria Versus Validação Química por Faixa

Esta verificação é apenas para garantir que, necessariamente, haja produtos químicos por faixa para qualquer faixa granulométrica.

Validação de Resultados Analíticos Iguais em Amostras Diferentes

Esta é uma verificação simples, mas importante, que considera a existência de resultados iguais para alguns analitos. A verificação é feita no Assay, elemento por elemento, classificando e

verificando a diferença ou existência de resultados iguais. Esta verificação deve ser feita para todos os analitos e é considerada um erro quando há os mesmos resultados para duas amostras diferentes. Nenhum resultado global igual foi encontrado entre duas amostras em todos os elementos.

Validação de Recuperação da Amostra

A verificação deve ser feita com um filtro considerando uma recuperação mínima de 60% de acordo com o “Manual de Boas Práticas de Gestão da Estimativa de Recursos”. Também pode haver intervalos com recuperação inferior a 60%, mas são intervalos com identificação NR-NS (não recuperados - não amostrados).

Validação de Fechamento das frações

Para verificar o Fechamento das frações, a soma dos valores de granulometria deve ser considerada. Em seguida, compare com o valor obtido da Tabela Assay. O limite aceitável para o fechamento do tamanho de partícula é de 99% a 101%.

Validação de Fechamento Químico

Verifica a estequiometria dos resultados químicos e a soma das frações granulométricas. Nesta etapa de validação, é verificado se o fechamento foi calculado corretamente e se os limites de fechamento são aceitáveis. Para este cálculo, foi utilizada a seguinte equação:

$$(Fe*1,4297)+SiO_2+(P*2,2913)+Al_2O_3+(Mn*1,2912)+CaO+MgO+TiO_2+K_2O+(Cu*1,2518)+LOI$$

Embora esta verificação mostre fechamentos químicos abaixo ou acima de uma faixa aceita, isso não é motivo para invalidar as amostras. Portanto, todas essas amostras permanecem no banco de dados, foram utilizadas na modelagem geológica e serão avaliadas geoestatisticamente se serão utilizadas nas estimativas.

Validação de Profundidade entre as Tabelas Assay, Header e Survey

Esta é uma das principais verificações do banco de dados. Basicamente, consiste em comparar a profundidade das sondagens nas três tabelas. A profundidade total de cada furo deve ser a mesma em todas as tabelas.

8.4. Determinações de Densidade

A densidade é um atributo com impacto direto na quantificação da massa de qualquer depósito mineral e, justamente por isso, é tratada como um item de grande relevância nos modelos geológicos de minério de ferro da VALE. Vários trabalhos foram desenvolvidos por profissionais da empresa ao longo dos anos, aplicando diferentes metodologias para determinação dos valores de densidade, dentre os quais se destacam: métodos tradicionais (Santos, 2006), perfilagem geofísica (Almeida, 2011) e cálculo mineralógico normativo (Ribeiro et al., 2014; Motta et al., 2016). Atualmente, os valores de densidade atribuídos aos blocos são feitos combinando os três métodos e os resultados podem ser vistos no Capítulo 11.

A validação de cada método adotado, bem como o valor final, foi feita por meio da análise de estatísticas descritivas, inspeção visual das seções verticais e revisão da análise química de cada material. A validação visa observar a consistência entre os valores médio, mínimo e máximo em comparação aos utilizados em modelos anteriores e resultados dos métodos convencionais.

8.4.1. Métodos de aquisição direta

Os métodos mais utilizados foram o Preenchimento de Volume e o Frasco de Areia para materiais friáveis ou o Deslocamento de Volume e o Método de pesagem hidrostática para materiais compactos. Abaixo, uma breve descrição de cada metodologia:

- Método de Preenchimento de Volume: Consiste em abrir um buraco com paredes regulares, remover o material e pesá-lo, revestir o buraco com plástico fino e enchê-lo com um volume conhecido de água.
- Método de Frasco de Areia: Consiste em cavar uma abertura no piso com paredes regulares, removendo e pesando o material extraído. Este buraco é então preenchido com a areia

selecionada de densidade conhecida e, a partir do volume de areia e dos dados de massa selecionados, a densidade do material é determinada.

- Método de Deslocamento de Volume: A densidade é calculada a partir da relação entre o peso da amostra e o deslocamento de água causado pela imersão da amostra em um recipiente graduado.
- Método de Pesagem Hidrostática: A densidade é derivada da relação entre o peso da amostra dividido pela perda de peso quando a mesma amostra é imersa em água, usando a balança de Jolly.

A umidade é obtida secando uma alíquota da amostra, comparando a massa (M) seca e úmida da amostra (M+MH₂O). Isso é muito importante porque nas avaliações da mina de minério de ferro da Vale, os cálculos de tonelagem são realizados com a densidade na base natural (pu), considerando a massa de água livre (MH₂O) obtida a partir das medições de umidade (u). Em todas as metodologias convencionais de determinação de densidade, os valores de densidade natural e umidade são determinados, e a densidade seca é calculada.

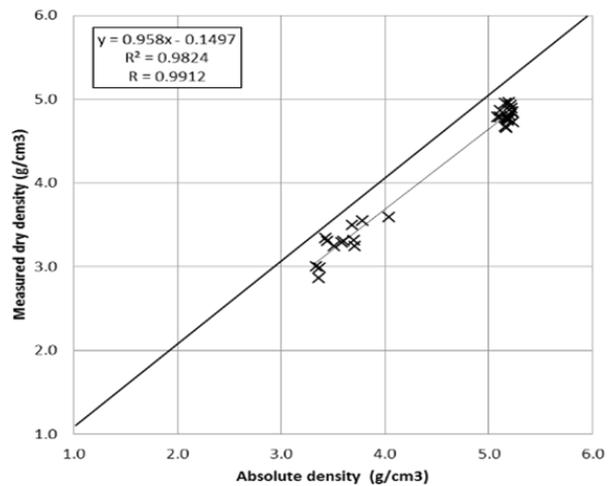
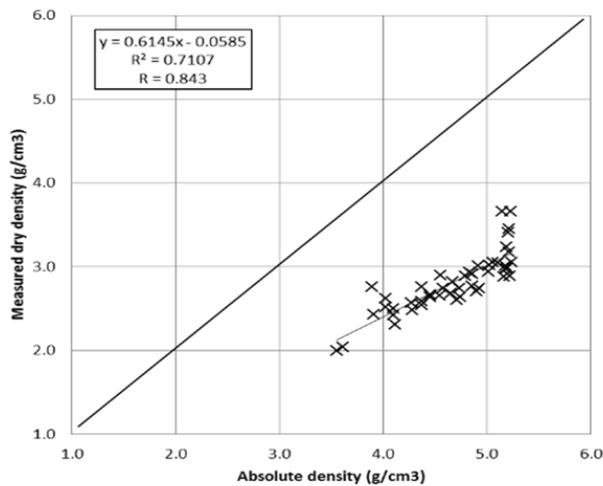
8.4.2. Métodos de aquisição indireta

A perfilagem geofísica retroespalhada gama-gama ou gama é baseada na interação da radiação com a matéria circundante. A sonda gama-gama possui uma fonte radioativa e um medidor de cintilação. Esta sonda emite radiação gama e, dependendo da densidade de elétrons presente, é desviada. O medidor de cintilação mede a quantidade de radiação dispersa pelo meio, então quanto mais densa a rocha, menor a quantidade dispersa. A técnica registra continuamente variações nas massas específicas de rochas atravessadas por um buraco. A medição da densidade total de uma rocha, com o perfil de densidade, é feita através de um feixe monoenergético de raios gama que bombardeia as paredes do furo.

8.4.3. Cálculo Normativo Mineralógico (CNM)

Os trabalhos de cálculo normativo foram desenvolvidos por Ribeiro (2003) para os litotipos das Formações Ferríferas Bandadas do Quadrilátero Ferrífero, complementados por observações feitas por Voicu et al. (1997) no que se refere ao cálculo da paragênese de rochas com perfil de desagregação relevante. Os primeiros estudos coordenados por Ribeiro no projeto interno da Vale foram realizados em 2010 apenas para itabiritos compactos siliciosos, onde a paragênese é basicamente composta por óxidos de ferro e quartzo. Considerando as proporções de cada mineral, obtidas com base na química global e suas respectivas densidades teóricas, a densidade total de cada amostra foi calculada. As correlações obtidas pela comparação desses resultados com os dados coletados por métodos diretos foram muito boas e, portanto, decidiu-se estender a aplicação dessa técnica aos outros litotipos enriquecidos com ferro em depósitos da VALE.

Estudos de caso realizados posteriormente por Motta et al. (2016) considerando as partições granulométricas para obtenção da paragênese e cálculo de densidade, também apresentaram boas correlações (Figura 8-1). Este trabalho representa um avanço na própria metodologia ao lidar com a diferença entre a densidade da parte mais fina e da parte mais grossa do material, pois, implicitamente, considera a porosidade de cada fração granulométrica.



Legenda:

Densidade seca medida (g/cm³)
 Densidade absoluta (g/cm³)

Measured dry density (g/cm³)
 Absolute density (g/cm³)

Densidade seca medida (g/cm³)
 Densidade absoluta (g/cm³)

Measured dry density (g/cm³)
 Absolute density (g/cm³)

Figura 8-1 - Regressão linear entre a densidade mineralógica e a densidade de base seca medida para amostras friáveis (esquerda) e compactas (direita), segundo Motta et al. (2016).

Estudos recentes baseados em testes de picnômetro realizados nos laboratórios do Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM) e no Centro de Pesquisa Tecnológica (CPT) da VALE confirmam os valores de densidade mineral calculados com essa metodologia. O banco de dados contém 267 amostras de material pulverizado da análise química de amostras de densidade por aquisição direta.

8.5. Opinião da pessoa qualificada sobre preparação de amostras, segurança e procedimentos analíticos

Os procedimentos de preparação, análise, controle de qualidade e segurança de amostras aplicados no Complexo Serra Norte mudaram com o tempo para atender às práticas da indústria e, frequentemente, eram práticas líderes da indústria.

A opinião da Pessoa Qualificada é que a preparação da amostra, análise, controle de qualidade e procedimentos de segurança são suficientes para fornecer dados confiáveis para apoiar a estimativa de recursos minerais e reservas minerais.

9. Verificação de dados

9.1. Verificação de dados internos

9.1.1. Coleta e armazenamento de dados

A gerência de exploração mineral responsável pela descrição geológica, coleta de dados e QA/QC possui procedimentos de verificações diárias, desde a sondagem até o recebimento dos resultados químicos das análises laboratoriais.

Durante o processo de sondagem, vários processos são verificados pelos fiscais de sondagem, desde a profundidade do furo, recuperação em cada manobra, até o transporte das caixas de testemunho para o galpão de testemunho. Após o furo ser realizado, é feita a perfilagem de desvio da trajetória espacial, acompanhado pelo fiscal de sondagem e com validação dos dados obtidos.

Para o recebimento, conferência e disposição das caixas nos arquivos de testemunho, existe escopo e protocolo de gerenciamento da qualidade visando a integridade física, identificação das caixas, disposição das caixas nos paletes (alinhadas para caixas plásticas ou empilhadas para caixas de madeira), caixas cintadas, paletes destravados, conferência das testeiras, sequências numéricas corretas, profundidade, avanço e recuperação das manobras.

O furo é exposto na sequência numérica de cada caixa e fotografado. É realizada a descrição geotécnica, descrição geológica, elaboração do plano de amostragem para análise química, elaboração do plano de amostragem para densidade e coleta de amostras. As amostras de testemunho coletadas para análise física e química são colocadas em sacos plásticos devidamente rotulados com etiquetas de código de barras.

As caixas com intervalos de meio-testemunho ou não amostrados são arquivadas conforme definido no procedimento de descarte de testemunho.

A Vale possui programas consistentes de QA/QC, incluindo procedimentos e protocolos de qualidade robustos, onde a precisão e a exatidão são avaliadas na maioria dos estágios de preparação e análise química das amostras geológicas. Amostras gêmeas e duplicatas de campo são usadas para monitorar erros de amostragem. Duplicatas de material britado e pulverizado para avaliação da preparação física (erro de subamostragem). Duplicatas externas e padrões para análise química (erro analítico). Para mitigação e possível reanálise, os resíduos de material pulverizado são mantidos em caixas plásticas identificadas. As inspeções contínuas são realizadas em laboratórios comerciais externos e internos não comerciais, garantindo assim uma melhoria efetiva do processo.

Os processos voltados ao controle e garantia de qualidade, e integridade dos dados estão em desenvolvimento e utilizados na validação de dados topográficos, perfilagem de trajetória espacial, descrição geológica, coleta de amostras e testes de densidade. Entre eles, podemos destacar as revisões por pares das informações geradas, validações de dados e relatórios de erros e mitigação.

Todos os registros técnicos relacionados aos perfis de furo de sondagem, perfilagem geofísica e espacial, fotografias de caixas de testemunho, descrição, testes de densidade, amostras, petrografia, resultados físicos e químicos, entre outros, que constituem uma fonte de dados e informações, são mantidos em repositório(s) e/ou sistema(s) de tecnologia da informação adequados e acessíveis para verificação e/ou investigação, sempre que necessário. Existem procedimentos operacionais para todos esses processos, que estão sob a responsabilidade da equipe de aquisição de dados na gestão de exploração de minerais ferrosos. A equipe da Vale também realiza revisões e auditorias laboratoriais regulares.

9.1.2. Estimativas de recursos minerais e reservas minerais

Um Comitê de Recursos e Reservas Minerais foi estabelecido dentro da Divisão de Ferrosos da Vale para documentar as informações de apoio às estimativas de recursos minerais e reservas minerais, incluindo todas as premissas técnicas e econômicas, e garantir sua confiabilidade. O comitê é composto por pessoas qualificadas/competentes de diferentes áreas e departamentos

(recursos, reservas, processamento mineral, geotecnia (cava, projeto e barragem), hidrogeologia, produção, estratégia, ambiental, espeleologia, finanças, direitos minerário, uso futuro de mineração, engenharia) que aprovam ou certificam a premissa para o trabalho relacionado à preparação de estimativas de recursos minerais e reservas minerais.

Os Recursos Minerais e as Reservas Minerais são estimados de acordo com as Diretrizes e Padrões Ferrosos Globais e da Vale para os protocolos de Relatórios de Recursos Minerais e Reserva Mineral. As diretrizes podem estar sujeitas a revisão ao longo do ano, com base em determinadas circunstâncias, como opiniões externas ou alterações em regulamentos externos.

As pessoas encarregadas pelas operações são responsáveis por garantir que as estimativas de reserva mineral e de recursos minerais, documentos técnicos e outras informações científicas e técnicas para sua operação sejam consistentes com as Diretrizes Globais e de Ferrosos da Vale. Essas pessoas responsáveis também supervisionam a gestão do banco de dados analítico e de amostras; estabelecem e mantêm programas de ensaio de QA/QC e furo de sondagem de testemunho para a operação; garantem que a reconciliação da produção seja rastreada e relatada trimestralmente; garantem que os resultados da adesão à lavra sejam rastreados e relatados anualmente ao Comitê de Recursos e Reservas para compilação e garantem que as ações de mitigação estejam em vigor para lidar com desvios dos planos rastreados; e fornecem documentação de apoio relacionada a alterações ou adições de materiais nas estimativas de reservas minerais e recursos minerais. Espera-se que as pessoas responsáveis pelas operações coordenem e, quando aplicável, ajudem as pessoas qualificadas da mina a coordenar com outros especialistas no assunto para obter todas as informações necessárias para apoiar a estimativa. Outros especialistas incluem indivíduos no marketing, jurídico, assuntos corporativos, finanças (imposto), planejamento estratégico e empresarial e sustentabilidade (meio ambiente, social, governança). Esses especialistas são responsáveis por fornecer as informações que podem ser exigidas pelo comitê de ferrosos de pessoas qualificadas para garantir que os relatórios que apoiam a divulgação de recursos minerais e reservas minerais contenham todas as informações pertinentes.

A equipe local de planejamento de mina de curto prazo e geologia de mina é normalmente responsável por coordenar com outros especialistas para obter todas as informações necessárias para preparar as estimativas. Os especialistas têm conhecimento em áreas como geoestatística, modelagem de blocos, procedimentos de amostragem e análise química, sondagem diamantada, geotecnia, geomecânica, hidrogeologia, hidrologia, programação, estimativa de custos, administração de terras, análise econômica, finanças, legislação e meio ambiente.

As pessoas qualificadas de reservas e recursos minerais são responsáveis por desenvolver e manter padrões de relatórios e estimativa de recursos minerais e reservas minerais, garantindo que tais padrões e diretrizes sigam as melhores práticas do setor e atendam aos requisitos corporativos da Vale, bem como aos requisitos legais.

As revisões técnicas das estimativas de reserva mineral e recurso mineral são feitas anualmente pelo Grupo de Gestão de Recursos (ou conforme necessário) para cada operação e mina. O Comitê de Reservas e Recursos Minerais de Ferrosos prepara e emite um relatório de revisão técnica para cada mina e operação com riscos identificados. Todos os riscos identificados requerem mitigação e tratamento, consistentes com a classificação de risco atribuída a eles, para serem consistentes com os requisitos de divulgação de SK1300, e para estarem em conformidade com as Diretrizes Globais da Vale para Gestão de Reservas Minerais e Recursos Minerais.

9.1.3. Estudos

A equipe da Vale realiza diversos estudos e relatórios internos para apoiar a estimativa do Recurso Mineral e Reserva Mineral de Serra Norte. Isso inclui estudos de reconciliação, avaliações de capacidade técnica de extração e diluição, investigações de discrepâncias de teor entre premissas do modelo e dados de sondagem, avaliações de densidade de furo de sondagem, revisões de plano de longo prazo e estudos de mina para atender aos critérios internos de financiamento para o progresso do projeto.

9.1.4. Reconciliação

A equipe de curto prazo da Serra Norte realiza avaliações mensais, trimestrais e anuais de reconciliação. A equipe de Recursos Minerais de longo prazo realiza avaliação trimestral e anual, planejamento/reservas de mina de longo prazo realizam reconciliação anual. Os resultados consolidados anuais reportam a comparação do modelo de curto prazo, recurso mineral e modelo de reservas, além disso, os teores e toneladas de produção são discutidos em reunião técnica anual para promover a melhoria contínua de todas as áreas envolvidas. Os resultados indicam que as toneladas e teores de minério do modelo de longo prazo são controlados dentro dos limites aceitáveis.

9.2. Verificação de dados externos

O complexo Serra Norte foi auditado em 2008 e novamente em 2010, quando o depósito N5 foi incluído nas reservas minerais. As auditorias anteriores incluíram uma visita técnica ao local, auditoria e revisão das práticas de sondagem, amostragem e análise química; desenvolvimento do modelo geológico; interpretação de variações de teor, validação de cálculos de recursos e reservas, custos de mina e processamento, aprovações e autorizações regulatórias. Em 2016, esses depósitos foram submetidos a outro processo de auditoria, onde Runge Pincock Minarco (RPM) revisou as técnicas de estimativa de reservas e recursos minerais e concluiu que estão em conformidade com os padrões da indústria para depósitos de ferro. Em 2019, os depósitos de N4 e N5 foram auditados pela RPMGlobal, que destacou, além da qualidade dos modelos geológicos e da estimativa de recursos, a qualidade das descrições geológicas e a preservação dos testemunhos de sondagem na conclusão de seu relatório. Os programas de verificação de dados externos mais recentes para cada depósito estão resumidos na tabela abaixo.

Tabela 9-1 - Verificação de dados externos, Operações da Serra Norte.

Depósito	Auditor	Ano
N1	RPM	2016
N2	RPM	2016
N3	RPM	2016
N4	RPM	2019
N5	RPM	2019

9.3. Opinião da pessoa qualificada sobre a adequação dos dados

Os dados verificados e carregados para o banco de dados e verificados usando os protocolos de camadas de responsabilidade são aceitáveis para uso na estimativa de Recursos Minerais e Reserva Mineral.

10. Processamento mineral e testes metalúrgicos

10.1. Resumo

Os depósitos de Serra Norte são caracterizados pelo alto teor de ferro, necessitando de poucos testes metalúrgicos para definir a rota do processo e monitorar o processo. Em geral, a rota do processo é definida com base na avaliação da análise química do modelo geológico do depósito. Essa análise possibilita determinar se o ROM de um determinado depósito deve ou não ser concentrado.

Para caracterizações adicionais que podem ser necessárias, as amostras podem ser coletadas da mina ou diretamente das plantas em operação.

A Operação de Serra Norte consiste em três plantas de processamento (Planta I, II e III) capazes de tratar juntas até 150 Mta de minério de diferentes minas a céu aberto dentro do complexo.

Em Serra Norte existem depósitos com teores de ferro acima de 65% que não necessitam de concentração para obtenção dos produtos, exceto o produto Pellet Feed da Planta I cujo teor é em torno de 64% Fe, obtido por concentração magnética.

A rota do processo considera o processamento com operações de britagem e peneiramento para ajustar a granulometria e a concentração do produto de -0,15mm. No entanto, há um projeto em andamento para adaptar a Planta I para processamento de umidade 100% natural. A conclusão deste projeto está prevista entre 2024 e 2025. Testes para este projeto não foram necessários, pois parte da planta já está operando com 100% de umidade natural.

A Serra Norte atualmente produz e processa minério cujo principal mineral de minério de ferro é a hematita. As plantas têm recuperações em massa de minério de ferro variando normalmente de 92% a 100%, dependendo das características do minério e de qual planta ele será tratado.

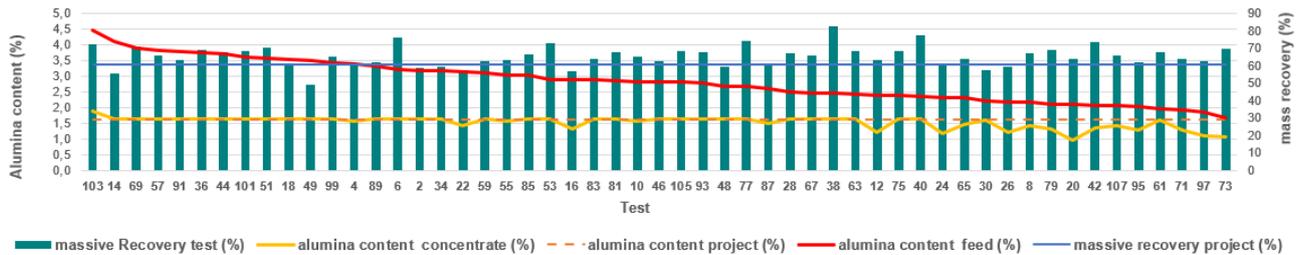
10.2. Laboratórios de teste

Os testes de beneficiamento são realizados principalmente no Centro de Pesquisa Tecnológica (CPT) da Vale ou no laboratório de processo externo. Não existe um padrão internacional de acreditação fornecido para laboratórios de testes de beneficiamento ou técnicas de teste de beneficiamento. Todas as análises químicas são realizadas utilizando as instalações dos laboratórios da Vale onde toda a cadeia produtiva é realizada.

10.3. Teste recente

O teste metalúrgico mais recente realizado para Serra Norte está relacionado à melhoria da qualidade do produto pellet feed, destinado à usina de pelotização de São Luís.

A usina de pelotização em São Luís é alimentada com o produto Pellet Feed da Planta I, e a atual rota de processo para a geração deste produto é a deslamagem. Alternativas de processamento foram estudadas para produzir pelotas comercialmente mais atraentes na planta de São Luís, visando reduzir o teor de alumina do produto pellet feed. Os melhores resultados foram obtidos pela rota de concentração magnética, que reduziu o teor de alumina para níveis abaixo de 1,65%, com recuperação de massa em torno de 61%. Uma série de testes de concentração magnética foi realizada em uma planta piloto na Serra Norte. Os resultados são mostrados na Figura 10-1.



Legenda:

Teor de alumina (%)
 Recuperação em massa (%)
 Teste

Alumina content (%)
 Mass recovery (%)
 Test

teste de Recuperação em massa (%)
 teor de concentrado de alumina (%)
 projeto de teor de alumina (%)
 teor de alumina na alimentação (%)
 projeto de recuperação em massa (%)

massive Recovery test (%)
 alumina content concentrate (%)
 alumina content project (%)
 alumina content feed (%)
 massive recovery project (%)

Figura 10-1 - Resultados do teste de trabalho de Concentração Magnética de Pellet Feed.

A linha tracejada no gráfico (% do projeto de teor de alumina) representa a meta de teor de Alumina. A linha amarela representa o teor de alumina dos testes. A linha azul representa a meta de recuperação em massa (61%) e as barras verdes, a recuperação em massa de cada teste. A linha vermelha representa o teor de alumina da alimentação em teste de concentração magnética. A tendência é que o teor de alumina na alimentação tenha valores abaixo de 3% obtendo um produto dentro da especificação deste elemento e garantindo a recuperação em massa esperada. Este estágio de concentração entrou em operação em 2021 e agora está aumentando.

10.4. Desempenho Atual

A Serra Norte opera com umidade natural e recuperação metalúrgica de 92% a 100%.

10.5. Elementos deletérios

Os elementos deletérios para os produtos de minério de ferro são silício, alumina, fósforo e manganês. Os teores de produções de umidade natural são diretamente controlados pela qualidade do próprio ROM e para essas produções.

A mina de Serra Norte é caracterizada por um alto teor de ferro com baixos contaminantes. O Sinter feed é geralmente utilizado para ajustar o teor dos sistemas sul e sudeste da Vale nos portos quando não é comercializado diretamente no mercado. Portanto, não há impacto na precificação do produto final.

Com a entrada da concentração de finos (-0,15mm), o produto de pelotas em São Luís se tornará mais competitivo devido à redução de deletérios.

Devido à alta qualidade dos produtos da Serra Norte, não são aplicadas sanções comerciais aos seus produtos.

10.6. Opinião de pessoa qualificada sobre processamento mineral e testes metalúrgicos

O desempenho de corpos de minério em usinas de beneficiamento é bem conhecido. A experiência de produção e os projetos desenvolvidos mais recentemente fornecem uma base sólida para prever a produção.

É natural que haja algumas variações na recuperação do processo de concentração úmida devido a mudanças no tipo de minério; no entanto, espera-se que essas variações mantenham a tendência do valor de recuperação esperado.

À medida que o conhecimento geológico avança, de tempos em tempos, isso pode levar a requisitos para ajustar os teores de corte, modificar o fluxograma do processo ou alterar os parâmetros da planta para atender às metas de qualidade, produção e economia.

11. Estimativa de recursos minerais

11.1. Resumo

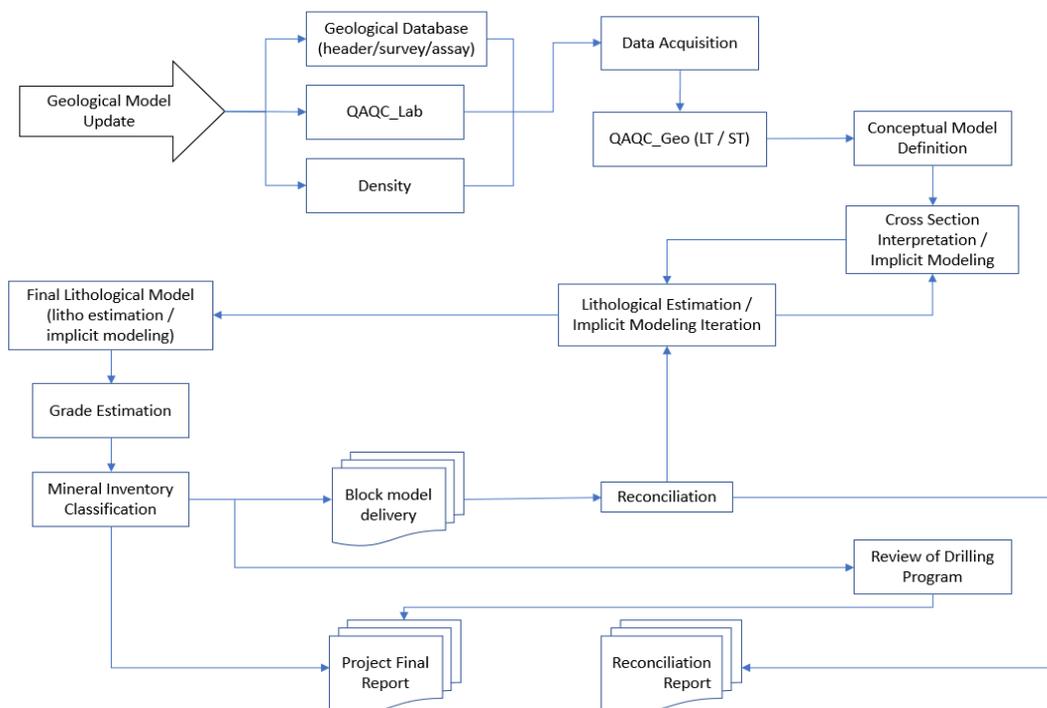
A estimativa de recursos inclui modelagem geológica, estimativa de teor e classificação de inventário mineral. Isso detalha a natureza do depósito e a confiabilidade das informações geológicas com as quais são registradas as características litológicas, estruturais, mineralógicas, de alteração ou outras características geológicas, geotécnicas e geometalúrgicas usadas em domínios tipológicos.

Concluída a etapa de modelagem geológica do depósito, utilizando técnicas explícitas, implícitas ou híbridas (combinando os dois métodos), essas informações são interpoladas no modelo de blocos. A variável litológica é atribuída ao bloco usando estimativas de krigagem indicadora (modelagem explícita) ou atribuída (*signalizada*) a partir de sólidos 3D (modelagem implícita). Para ambos os casos, a litologia majoritária é considerada. Esta variável é utilizada como obrigatória na interpolação e classificação de teores do inventário mineral.

A interpolação de teor utiliza métodos de estimativa multivariada por (co)krigagem ordinária com base em modelos de correlação intrínseca (ICM). A estimativa é atribuída aos domínios litológicos usando o princípio do limite rígido. Ou seja, os blocos pertencentes a um domínio podem ser estimados apenas com amostras do mesmo domínio.

Os inventários minerais dos modelos de blocos são classificados com base no cálculo do "Índice de Risco" (RI), que segue o método de classificação originalmente proposto por Amorim e Ribeiro (1996) e posteriormente reformulado por Ribeiro et al. (2010).

O fluxograma a seguir apresenta as principais macro etapas do banco de dados, modelagem geológica, estimativa de teor e classificação do inventário mineral dos depósitos de minério de ferro da Vale (Figura 11-1).



Legenda:

Atualização do Modelo Geológico	Banco de Dados Geológico (título/pesquisa/ensaio)	Aquisição de Dados	
	QAQC_Lab	QAQC_Geo (LT / ST)	Definição do Modelo Conceitual
	Densidade		Interpretação de Seção

			Transversal / Modelagem Implícita
Modelo Litológico Final (estimativa litológica/modelagem implícita)		Estimativa Litológica/Iteração de Modelagem Implícita	
Estimativa de Teor			
Classificação de Inventário Mineral	Fornecimento do Modelo de Blocos	Reconciliação	
			Revisão do Programa de Sondagem
	Relatório Final do Projeto	Relatório de Reconciliação	
<i>Geological Model Update</i>	<i>Geological Database (header/survey/assay)</i>	<i>Data Acquisition</i>	
	<i>QAQC_Lab</i>	<i>QAQC_Geo (LT / ST)</i>	<i>Conceptual Model Definition</i>
	<i>Density</i>		
			<i>Cross Section Interpretation / Implicit Modeling</i>
<i>Final Lithological Model (litho estimation / implicit modeling)</i>		<i>Lithological Estimation / Implicit Modeling Iteration</i>	
<i>Grade Estimation</i>			
<i>Mineral Inventory Classification</i>	<i>Block model delivery</i>	<i>Reconciliation</i>	
			<i>Review of Drilling Program</i>
	<i>Project Final Report</i>	<i>Reconciliation Report</i>	

Figura 11-1 - Fluxograma de macroprocessos de modelagem, estimativa de teor e classificação do inventário mineral de depósitos ferrosos

O Complexo Serra Norte é composto por cinco diferentes minas/depósitos, listados a seguir: N1, N2, N3, N4 e N5. O depósito N4 é composto por depósito N4E e depósito N4W. Essas minas compartilham as mesmas instalações logísticas e possuem sinergias e integrações operacionais. Os procedimentos para Estimativa de Recursos Minerais são padronizados no Departamento de Ferrosos da Vale. Eles serão descritos como um único processo para evitar repetição. Sempre que necessário, as diferenças ou particularidades nos procedimentos das minas que compõem o Complexo de Mineração Serra Norte serão destacadas e listadas nesta seção do Relatório Técnico.

11.2. Banco de dados de recursos

O banco de dados utilizado para estimar os teores dos depósitos da Serra Norte é composto por análises químicas de Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, LOI, TiO₂, MgO e CaO. Esses elementos foram analisados em diferentes frações granulométricas e posteriormente agrupados em 4 frações, G1A (+ 19 mm), G1B (-19 + 8 mm), G2 (-8 + 0.15 mm) e G3 (-0.15 mm). A atualização dos modelos geológicos e de blocos dos depósitos de Serra Norte foi concluída após extensa revisão de todo o banco de dados.

11.2.1. Verificação do banco de dados

Os principais pontos de verificação do banco de dados são os seguintes:

- Agrupamento de dados de química: com a inclusão dos dados de química para as diferentes frações granulométricas, os teores globais de muitas amostras foram recalculados usando essas informações, portanto, foi necessário consolidar os dados de química global calculados e analisados em um único grupo de variáveis;
- Exclusão de intervalos sem química (FEGL = -99). Número de amostras excluídas: 2.325.
- Exclusão de amostras sem SiO₂ e Al₂O₃ globais (SIGL e ALGL = -99): 356 amostras que contêm apenas informações químicas globais e não apresentam resultados de SiO₂ e Al₂O₃ foram descartadas;
- Exclusão de amostras sem PGL (01 amostra), ALGL (12 amostras), NGL (20 amostras) e LOIGL (08 amostras);
- Amostras com fechamento químico global ruim, abaixo de 94% ou acima de 105%, foram descartadas. Foram excluídas cinco amostras com fechamento inferior a 94%. Nesta análise foi utilizado um valor de 94%, não 95%, para a preservação de amostras de FM;
- As amostras que apresentaram resultado de recuperação por intervalo foram avaliadas, e os intervalos com recuperação inferior a 60% foram descartados. 10 amostras foram eliminadas nesta condição;
- A fórmula para o cálculo de fechamento para frações de tamanho de fragmento e química global, considerando apenas os elementos que participaram da estimativa, é:

$$FQGL = FEGL * 1,4297 + SIGL + PGL * 2,2913 + ALGL + MNGL * 1,2912 + PFGL + TIGL + MGGL + CAGL$$

11.3. Interpretação geológica

A modelagem geológica dos litotipos é baseada na homogeneidade química, granulométrica e/ou mineralógica que os diferencia uns dos outros. Além disso, eles devem ter contatos bem definidos, com passagens relativamente nítidas entre eles. A natureza genética do contato também deve ser entendida para que sua continuidade em profundidade seja modelada. Os modelos foram concluídos a partir de seções geológicas verticais, com sua interpretação apoiada por sondagem e mapeamento de subsuperfície.

O modelo geológico para a mina N1 foi construído com base em 52 seções geológicas verticais na direção NE-SW, com 48 seções verticais com espaçamento de 200 m e 4 seções com espaçamento de 100 m (Figura 11-2). O modelo reproduz satisfatoriamente a continuidade dos corpos mineralizados, sua rocha hospedeira, sobrecarga e rochas intrusivas presentes no depósito N1. Este modelo foi auditado pela RPMGlobal em 2016.

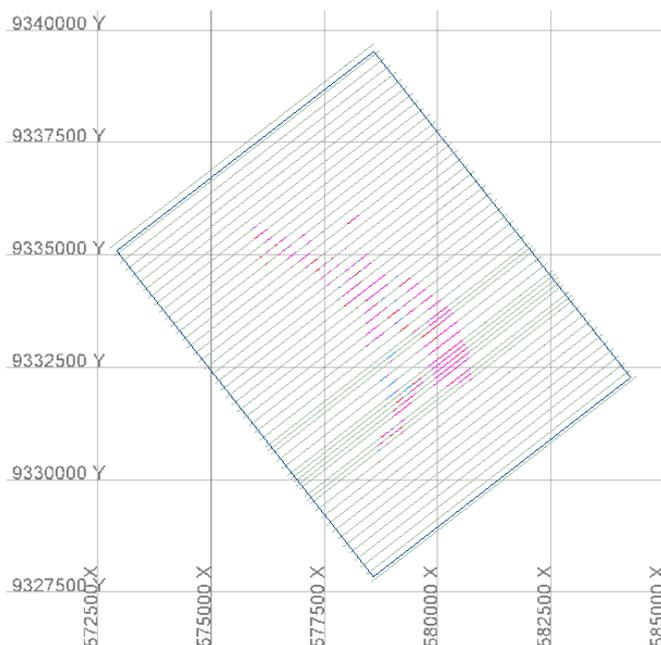


Figura 11-2 - Disposição das seções geológicas verticais interpretadas no Modelo N1

No modelo geológico de N2, 14 seções verticais espaçadas a 200 m e 3 seções intermediárias foram interpretadas, totalizando 17 seções verticais com direção NS.

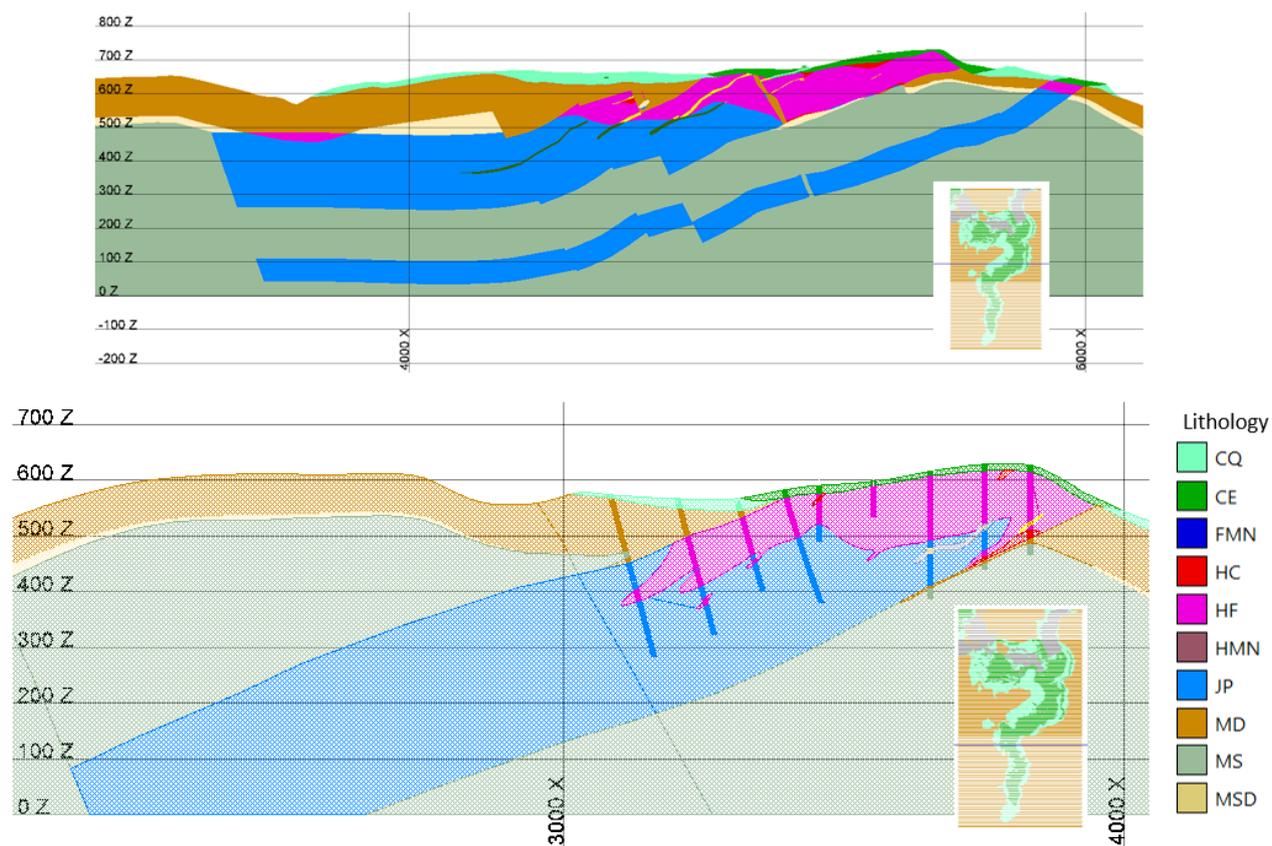
No modelo geológico de N3, 19 seções verticais foram interpretadas, com 18 espaçadas a 200 m entre si e 1 seção intermediária. O modelo N3 tem sido apoiado por várias campanhas de sondagem realizadas por diferentes empresas desde 2002. Reproduz satisfatoriamente a continuidade dos corpos mineralizados, sua rocha hospedeira e sobrecarga.

Por se tratar de uma mina ativa, a maior parte das informações para o modelo do depósito N4 foi obtida por mapeamento geológico em escala 1:2.000, realizado ao longo das bancadas da mina pela equipe de Geologia de Curto Prazo. A interpretação também foi suportada por testemunhos de sondagem diamantada. 167 seções geológicas verticais da direção E-W foram interpretadas no modelo geológico de N4, como segue:

- N4W: 106 seções verticais espaçadas em 100 m entre si e 7 seções intermediárias na cava central, espaçadas em 50 m entre si.
- N4E: 54 seções verticais com espaçamento de 100 m. Nas porções norte e central da cava, as seções verticais são deslocadas 25 m para sul em relação ao conjunto de seções de N4W mencionadas acima. Este deslocamento justifica um melhor posicionamento das seções com a malha de sondagem, evitando projetar furos em seções distantes.

Para o modelo geológico da mina N5, 145 seções geológicas verticais foram interpretadas, na direção E-W, com espaçamento de 100 x 100 m, localmente concentradas em 50 x 50 m, como pode ser visto na Figura 11-3.

O modelo geológico suportou o planejamento da mina e foi auditado em 2016 pela RPMGlobal. Este modelo reproduz satisfatoriamente a continuidade de corpos mineralizados, suas rochas hospedeiras e decapeamento.



Legenda:

Litologia
 CQ
 CE
 FMN
 HC
 HF
 HMN
 JP
 MD
 Interface
 MSD

Lithology
 CQ
 CE
 FMN
 HC
 HF
 HMN
 JP
 MD
 MS
 MSD

Figura 11-3 - Seções geológicas verticais típicas da porção norte da Mina N5

11.4. Modelagem geológica

11.4.1. Metodologia de modelagem geológica

A construção de modelos de massa na VALE Ferrosos é feita usando um método misto que combina a estimativa geoestatística de variáveis categóricas e modelagem 3D. O método de estimativa dessas variáveis categóricas combina o uso de dados diretos (descrição dos testemunhos de sondagem) e dados indiretos (mapa geológico e interpretações geológicas). A estimativa litológica visa transferir a continuidade geológica interpretada durante a modelagem (seções bidimensionais) para um espaço tridimensional representado por modelos de blocos.

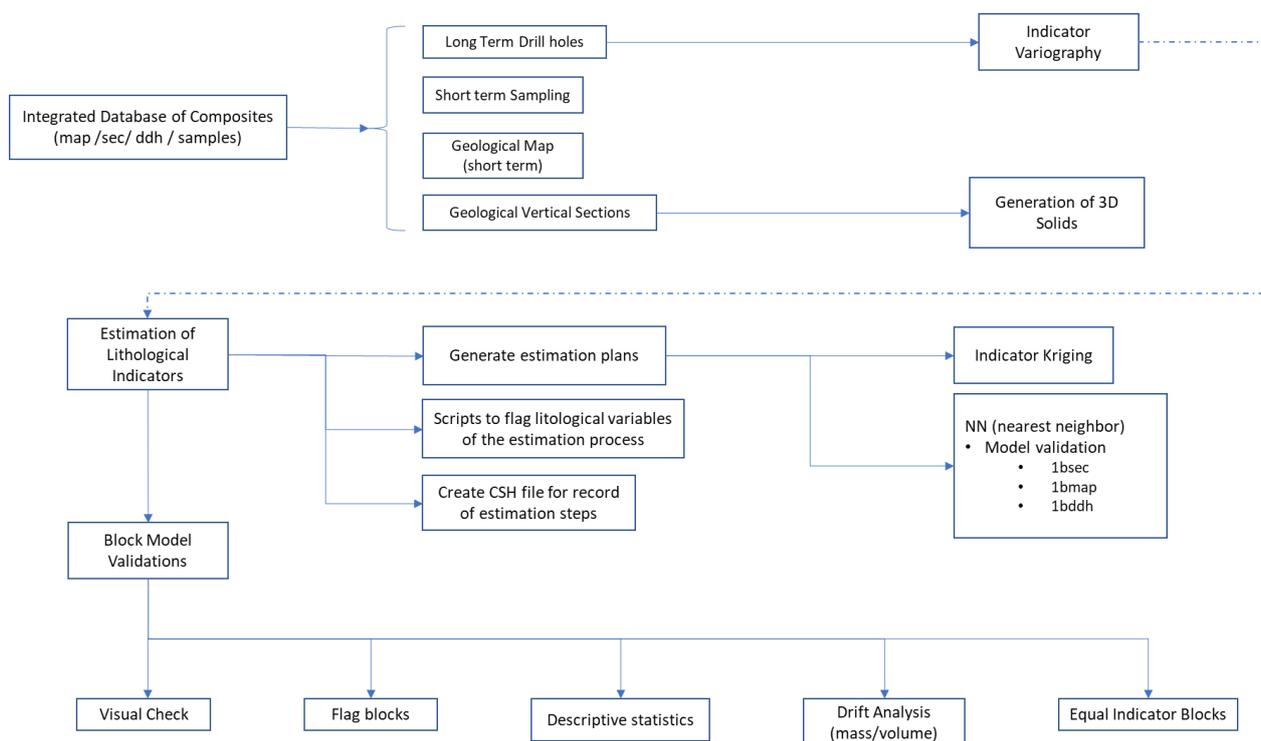
A modelagem geológica da geometria dos corpos é responsável por prever as tonelagens a serem lavradas. A modelagem espacial da distribuição do teor é realizada por métodos matemáticos e geoestatísticos e está fortemente ligada à definição de litotipos e à estratégia de modelagem geométrica (Guimarães et al., 2005).

Modelagem explícita com estimativa de indicadores

A modelagem explícita a partir da interpretação de seções verticais é gerada com a ajuda do software Vulcan®. As seções verticais são preferencialmente perpendiculares aos corpos mineralizados. O espaçamento entre seções dependerá da disposição espacial das informações de sondagem, que normalmente podem variar entre 50 m e 100 m. Como exceção, os locais que não possuem essas informações podem ter suas seções mais espaçadas, mas isso afetará diretamente a eficiência/robustez do interpolador. A interpretação é feita usando metade do espaço entre as seções que influenciam a seção, na qual cada furo pertencente a este corredor é projetado na seção, ou no caso de informações divergentes, prevalece o mais próximo da seção.

A interpretação geológica em seções é materializada diretamente no modelo de blocos utilizando o método de krigagem por indicadores (IK). Este método consiste em transformar um conjunto de dados litológicos em variáveis de indicadores, respeitando os procedimentos de krigagem ordinária. Essas variáveis espacialmente distribuídas e dependentes espacialmente são transformadas em variáveis binárias (0 ou 1), onde é calculada a probabilidade de cada variável pertencente ou não a um grupo litológico em cada posição espacial. Esta metodologia foi desenvolvida por Journel (1983), onde o autor propôs uma função de distribuição cumulativa condicional para estimar dados espaciais.

A metodologia adotada neste trabalho foi desenvolvida por Ribeiro e Carvalho (2002) e modificada por Roldão et al. (2006). Os autores propõem a combinação de métodos convencionais de modelagem com o método de estimativa de krigagem dos indicadores, no qual as seções interpretadas são reticuladas e utilizadas no processo de estimativa, juntamente com o banco de dados de sondagem e informações de curto prazo (mapas e/ou amostras). A alocação da variável litológica é baseada na pseudo-probabilidade calculada para cada indicador litológico, assumindo o valor da maioria. A Figura 11-4 apresenta um fluxograma com as etapas de aquisição, estimativa e validação da variável litológica.



Legenda

Banco de Dados Integrado de Compósitos (map/sec/ddh/amostras)	Furos de Longo Prazo	Variografia do Indicador
	Amostragem de Curto Prazo	
	Mapa Geológico (curto prazo)	
	Seções Geológicas Verticais	Geração de Sólidos 3D
Estimativa de Indicadores Litológicos	Gerar planos de estimativa	Krigagem dos Indicadora
	Scripts para sinalizar variáveis litológicas do processo de estimativa	NN (vizinho mais próximo) Validação do modelo

			1 bsec 1 bmap • 1bddh	
		Criar arquivo CSH para registro das etapas de estimativa		
Validações do Modelo de Blocos				
Verificação Visual	Blocos de sinalização	Estatísticas descritivas	Análise de Desvio (massa/volume)	Blocos de Indicadores Iguais
<i>Integrated Database of Composites (map /sec/ ddh / samples)</i>	<i>Long Term Drill holes</i>		<i>Indicator Variography</i>	
	<i>Short term Sampling</i>			
	<i>Geological Map (short term)</i>			
	<i>Geological Vertical Sections</i>		<i>Generation of 3D Solids</i>	
<i>Estimation of Lithological Indicators</i>	<i>Generate estimation plans</i>		<i>Indicator Kriging</i>	
	<i>Scripts to flag litological variables of the estimation process</i>		<i>NN (nearest neighbor)</i> <i>Model validation</i> 1 bsec 1 bmap • 1bddh	
	<i>Create CSH file for record of estimation steps</i>			
<i>Block Model Validations</i>				
<i>Visual Check</i>	<i>Flag blocks</i>	<i>Descriptive statistics</i>	<i>Drift Analysis (mass/volume)</i>	<i>Equal Indicator Blocks</i>

Figura 11-4 - Fluxograma de macroprocessos para modelagem e estimativa de teores e classificação do inventário mineral de depósitos de minério de ferro

11.4.2. Estimativa litológica da Serra Norte

Os modelos da Serra Norte foram construídos com o método de Krigagem Indicadora (IK) (Ribeiro e Carvalho, 2002; Roldão et al., 2006).

O método de estimativa de litologia de IK foi adotado neste trabalho para reduzir o tempo gasto na geração de seções horizontais (trabalho “mecânico”). O método foi validado por Roldão et al. (2006) e os autores apresentam IK como uma técnica eficaz e mais ágil do que os métodos convencionais utilizados no passado (método de extrusão de seções horizontais).

Banco de Dados de Indicadores de Litologia

O processo geoestatístico para estimativa de litotipos considera informações de longo e curto prazo e, para isso, foi criada a variável de indicador binário V_IND, que representa a presença do litotipo na amostra regularizada (1 se presente e 0 se ausente). Outras variáveis V_IND geralmente são criadas (V_IND1, V_IND2, V_IND3, etc.) para testar diferentes distribuições de indicadores, visando encontrar o que melhor representa a continuidade espacial dos litotipos a serem estimados.

As variáveis dos indicadores são atribuídas ao campo geocódigo (litotipo). Por exemplo, uma amostra de geocódigo HF regularizada terá o valor "1" atribuído à sua variável de indicador "IHF", enquanto o valor "0" será atribuído às outras variáveis de indicadores (para os outros litotipos). Para os litotipos que não serão estimados por IK, o valor "-99" é atribuído aos campos das variáveis de indicadores.

11.4.2.1. N1 – Litotipos

Análise Variográfica de Indicadores

O estudo variográfico do modelo N1 foi realizado a partir da análise de um único variograma para todos os indicadores, com base na hipótese de que os indicadores teriam correlação intrínseca, ou seja, seus variogramas teriam a mesma faixa e variariam apenas na escala vertical (soleira). Todas as etapas da variografia foram realizadas com a ajuda do software Vulcan® e Isatis®. Amostras/intervalos de banco de dados de longo e curto prazo (N1flp_1215_var_entry.csv) foram usados para a análise variográfica.

A escolha dos litotipos dos compósitos que participaram da variografia como variável binária foi: 1 para litotipos HF, HC e HMN e 0 para litotipos CE, CQ, FM, JP, MS, MSD, MS. Os três tipos de litotipos máficos são diferentes na forma de ocorrência, seja dique (DK: MDDK, MSDDK, MSDK) ou soleira (SL: MDL, MSDL, MSSL), além da ocorrência como rocha hospedeira (topo e base da formação ferrífera, MD, MSD, MS). No entanto, para a estimativa litológica, os grupos máficos são consolidados. Assim, temos o grupo de máfica decomposta (MD), que compreende MD, MDDK, MDL, o grupo de máfica semidecomposta (MSD), que compreende MSD, MSDDK, MSDL, e o grupo de máfica sã (MS), que compreende MS, MSDK, MSSL.

Setores estruturais

O modelo N1 foi dividido em 7 setores estruturais em função das variações na inclinação e das direções das camadas dos corpos de minério. Esses setores foram importantes para representar as diferenças na atitude dos corpos de minério e adicionar melhor representação litológica do depósito. Os Setores Estruturais foram aplicados em todo o modelo N1 para a estimativa de litologia.

Interpolação de indicadores

Na construção do modelo de blocos do indicador litológico, a etapa inicial é a geração do modelo de blocos de litologias de resíduos a partir da construção de sólidos 3D com base nas seções verticais. Após essa etapa, a estimativa dos indicadores litológicos é realizada dentro do limite definido como formação ferrífera. A krigagem ordinária foi usada para estimar os indicadores litológicos, com cada litotipo estimado por IK representando uma variável de indicador, totalizando 10 variáveis (icq, ice, ihf, ihc, ihm, ifm, ijp, imd, imsd, ims).

O método NN foi adotado para validar a estimativa de krigagem. Neste estágio, os mesmos parâmetros utilizados na krigagem foram reproduzidos na estimativa de NN. Os planos de estimativa foram criados para que o modelo de blocos respeitasse a seção interpretada (1bsec) e as informações de sondagem (1bflp). Esses planos são explicados na Tabela 11-1.

Tabela 11-1 - Parâmetros usados nos planos de estimativa de litotipo

Parâmetros	Krigagem	NN	1bflp	1bsec
Grupo	15MFLP/SEC		15MFLP	SEC
Mín. de amostras	1	1	1	1
Máx. de amostras	16	1	1	1
Octante	2	-	-	-
Discretização de blocos	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1
Intervalo de pesquisa	450 x 150 x 50		15 x 15 x 9	

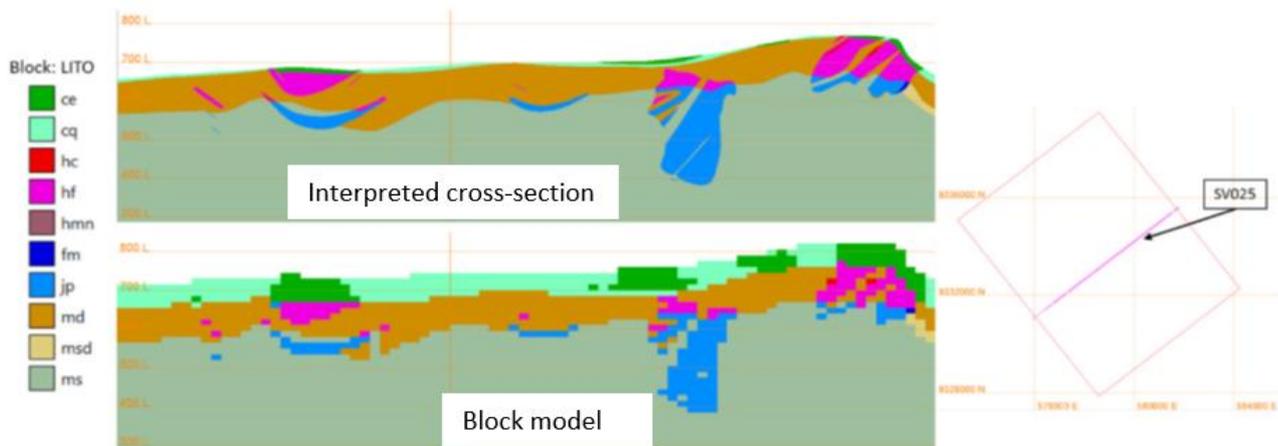
Validação

Para validar a variável "lito" estimada por IK, é realizada uma série de verificações:

Resumo da Estimativa – avalia o número de blocos estimados para cada plano de krigagem. Para planos de krigagem com os mesmos parâmetros de estimativa, é obrigatório ter o mesmo número de blocos estimados.

Verificação visual – é definida como a validação principal, na qual é avaliada visualmente bloco a bloco se IK conseguiu reproduzir a continuidade da interpretação geológica proposta pelo geólogo, Figura 11-5. A validação visual é realizada em seções verticais, horizontais e longitudinais. Esta validação é sempre feita em conjunto com o geólogo de modelagem, e a necessidade de gerar seções em diferentes orientações para reproduzir a continuidade geológica interpretada pelo geólogo é avaliada.

Blocos vazios – 60 blocos vazios foram identificados no processo de estimativa. Isso foi corrigido aplicando a estimativa de NN a esses blocos.



Legenda:
Bloco: LITO

Seção transversal interpretada
Modelo de blocos

Bloco: LITO

Interpreted cross-section
Block model

Figura 11-5 - Comparação entre a seção vertical geológica interpretada (SV_025) e a seção do modelo de blocos

Blocos de sinalização – O objetivo desta verificação é validar a adesão entre o litotipo das amostras e a litologia do modelo de blocos. O procedimento consiste em atribuir a amostra com a litologia do bloco a que pertence e comparar este atributo com a litologia da amostra no banco de dados. Em geral, as discrepâncias estão relacionadas a amostras de comprimento curto (muito menor do que o tamanho do bloco) em que é possível encontrar mais de uma amostra dentro do bloco.

Análise de Desvio (Vizinho Mais Próximo (NN)) – A análise de desvio é feita para avaliar se o processo de estimativa é enviesada em relação às amostras. Entre os litotipos de minério, a comparação entre as proporções apresentadas pelos diferentes métodos para os litotipos HF e JP mostrou bons resultados. Por outro lado, o gráfico do litotipo FM, HMN e HC mostrou maior enviesamento relativo. Isso se deve à pequena quantidade de FM, HMN e HC no modelo, além do fato do processo IK possuir caráter de suavização. No entanto, devido à melhor continuidade da estimativa por IK, foi decidido o resultado da krigagem dos indicadores litológicos.

11.4.2.2. N2 – Litotipos

Análise variográfica de indicadores

O estudo variográfico do modelo N2 foi realizado a partir da análise de um único variograma para todos os indicadores, com base na hipótese de que os indicadores teriam correlação intrínseca, ou seja, seus variogramas teriam a mesma faixa e variariam apenas na escala vertical (soleira). Todas as etapas da variografia foram realizadas com a ajuda do software Vulcan® e Isatis®. Somente amostras/intervalos de banco de dados de longo prazo (N2flp_var_entry.csv) foram usados para a análise variográfica.

A escolha dos litotipos dos compósitos que participaram da variografia como variável binária foi: 1 para litotipos HF, HC, HMN, CE, CQ, FMN e JP e 0 para litotipos MS, MSD, MS e QT.

Setores estruturais

O modelo foi estimado como um único setor. Os Setores Estruturais não foram aplicados na estimativa das litologias, pois a estrutura das rochas não apresenta mudanças abruptas na direção e/ou inclinação.

Interpolação de indicadores

Na construção do modelo de blocos do indicador litológico, a etapa inicial é a geração do modelo de blocos de litologias de resíduos a partir da construção de sólidos 3D com base nas seções verticais. Após essa etapa, a estimativa dos indicadores litológicos é feita dentro do limite definido como formação ferrífera.

A krigagem ordinária foi usada para estimar os indicadores litológicos, com cada litotipo estimado por IK representando uma variável de indicador, totalizando 12 variáveis (icq, ice, ihf, ihc, ihm, ifmn, ijp, imd, imsd, ims, iqt, iin).

A Tabela 11-2 apresenta a relação dos litotipos modelados por 3D e aqueles estimados por IK.

Para validar a estimativa de krigagem, foi adotado o método de NN. Neste estágio, os mesmos parâmetros utilizados na krigagem foram reproduzidos na estimativa de NN. Os planos de estimativa foram criados para que o modelo de blocos respeitasse a seção interpretada (1bsec) e as informações de perfuração (15bflp).

Tabela 11-2 - Parâmetros usados nos planos de estimativa de litotipo

Parâmetros	Krigagem	NN	15bflp	1bsec
Grupo	15MFLP/SEC		15MFLP	SEC
Mín. de amostras	1	1	1	1
Máx. de amostras	16	1	1	1
Octante	2	-	-	-
Discretização de blocos	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1
Intervalo de pesquisa	400 x 200 x 50		15 x 15 x 9	

Validação

Para validar a variável "lito" estimada por IK, são utilizados os mesmos procedimentos que em N1: resumo da estimativa, verificação visual (Figura 11-6), blocos vazios, blocos de sinalização e NN de análise de desvio (Figura 11-7).

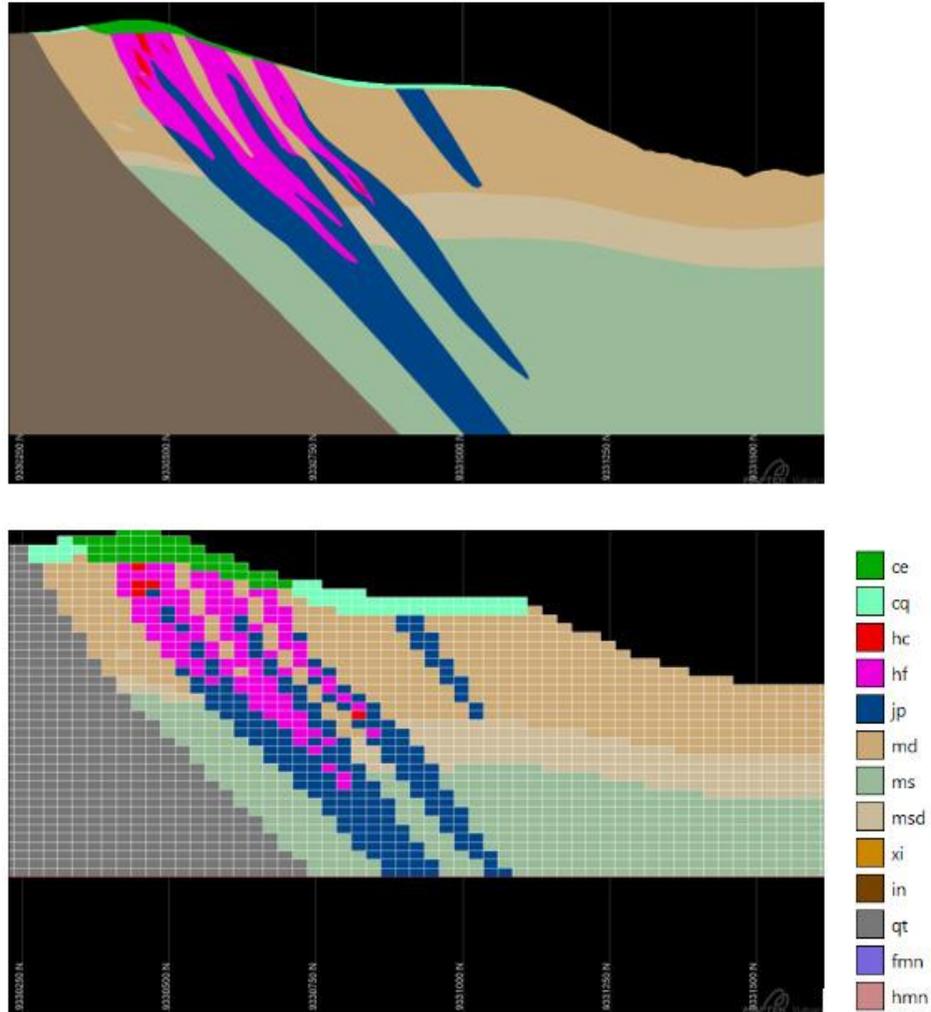
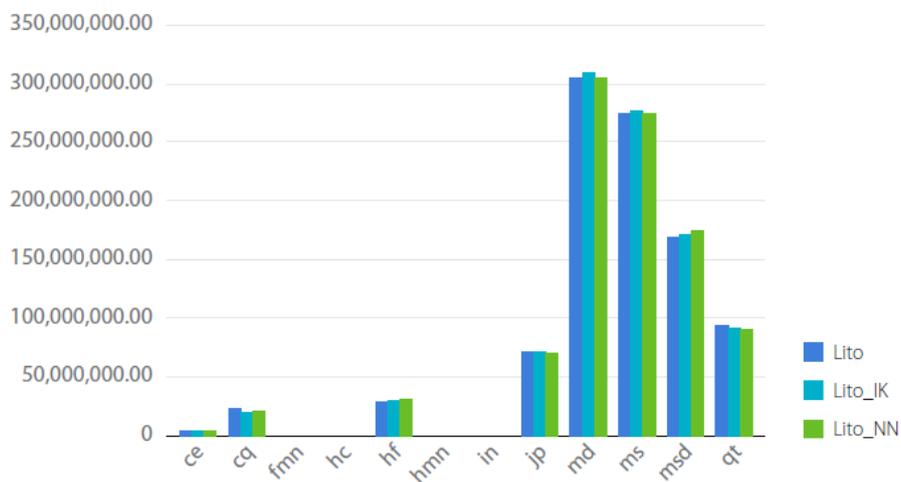


Figura 11-6 - Comparação entre a seção vertical geológica interpretada (SV_10) e a seção do modelo de blocos



Legenda:
Lito

11.4.2.3. N3 – Litotipos

Análise variográfica de indicadores

O estudo variográfico do modelo N2 foi realizado a partir da análise de um único variograma para todos os indicadores, com base na hipótese de que os indicadores teriam correlação intrínseca, ou seja, seus variogramas teriam a mesma faixa e variariam apenas na escala vertical (soleira). Todas as etapas da variografia foram realizadas com a ajuda do software Vulcan® e Isatis®. Somente amostras/intervalos de banco de dados de longo prazo (n3_n3flp_var_entry.csv) foram usados para a análise variográfica.

A escolha dos litotipos dos compósitos que participaram da variografia como variável binária foi: 1 para os litotipos de formação ferrífera (HF, HC, HMN, CE, FMN, JP) e 0 para os litotipos de resíduos (XI, MS).

Setores estruturais

Inicialmente, os setores estruturais para a estimativa dos indicadores litológicos foram definidos no modelo de blocos. Esses setores têm como objetivo representar a continuidade geológica interpretada. Dois setores estruturais foram criados: 1) norte (Azimute 60°/Queda 0°/Mergulho -60°); 2) sul (Azimute 85°/Caimento 0°/Mergulho -50°). Os limites entre os setores norte e sul foram definidos por sólidos criados a partir das seções verticais interpretadas.

Interpolação de indicadores

A primeira etapa na construção do modelo de blocos do indicador litológico é a geração de um modelo de blocos de litologia de resíduos da construção de sólidos 3D com base em seções verticais. Após essa etapa, a estimativa dos indicadores litológicos é feita dentro do limite definido como formação ferrífera.

A krigagem ordinária foi usada para estimar os indicadores litológicos, com cada litotipo estimado por IK representando uma variável de indicador, totalizando 11 variáveis.

Para validar a estimativa de krigagem, foi adotado o método de NN. Neste estágio, os mesmos parâmetros utilizados na krigagem foram reproduzidos na estimativa de NN. Os planos de estimativa foram criados para que o modelo de blocos respeitasse a seção interpretada (1bsec) e as informações de perfuração (1bflp). Esses planos são explicados na Tabela 11-3 e Tabela 11-4.

Tabela 11-3 - Lista de litotipos modelados por sólido (3D) e/ou estimados por IK

Litotipos Modelados	Modelagem 3D	Nome do Arquivo	Krigagem Indicadora	Indicador de Litotipo
CE	x	solido_3d_n3_ce.00t solido_3d_n3_ce1.00t solido_3d_n3_ce2.00t		ice
CQ	x	solido_3d_n3_cq.00t solido_3d_n3_cq1.00t		icq
HF			x	lhf
HC			x	lhc
HMN			x	lhmn
JP			x	ljp
FMN			x	lfmn
Interface	x	solido_3d_n3_ms.00t		ims
MSD	x	solido_3d_n3_msd.00t		lmsd
MD	x	solido_3d_n3_md.00t		lmd
XI	x	solido_3d_n3_xi.00t		ixi

Tabela 11-4 - Parâmetros usados nos planos de estimativa de litotipo

Parâmetros		Krigagem	NN	1bflp	1bsec
Amostras	Bancos de dados	N3_n3.cik.isis			
	Grupo	15MFLP/SEC		15MFLP	SEC
	Mín. de amostras	1	1	1	1
	Máx. de amostras	16	1	1	1
	Octante	Sim	-	-	-
Blocos	Discretização	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1		
	Intervalo de pesquisa	400 x 180 x 30		15 x 15 x 9	15 x 15 x 9

Validação

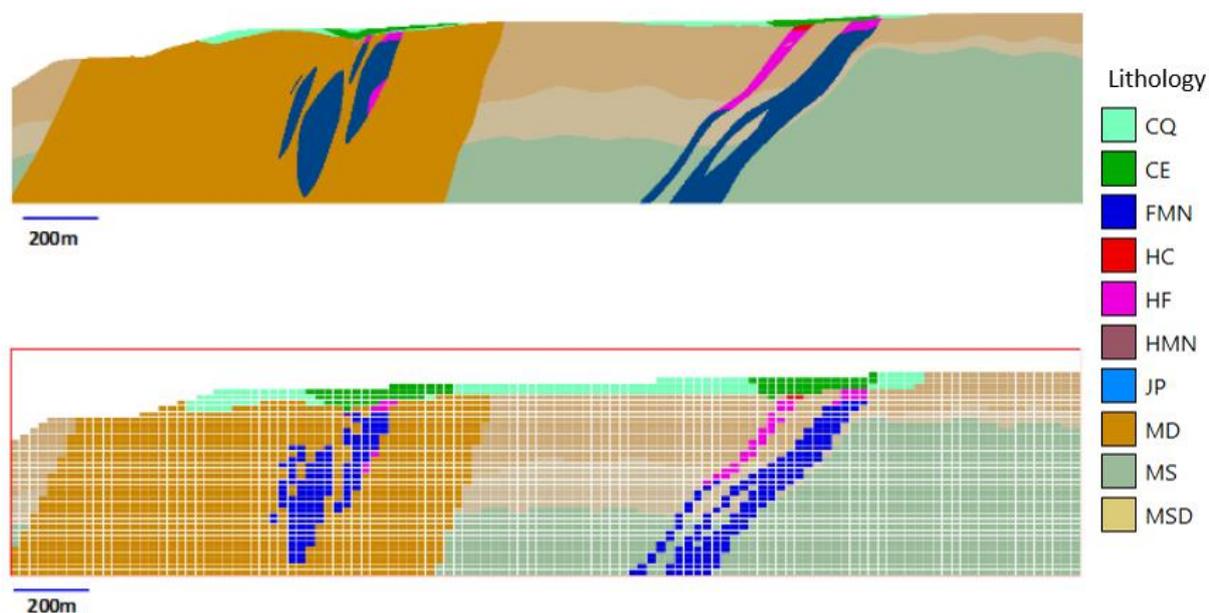
Para validar a variável "lito" estimada por IK, são utilizados os mesmos procedimentos que em N1: resumo da estimativa, verificação visual (Figura 11-8), blocos vazios, blocos de sinalização e NN de análise de desvio (lito

lito_ik

lito_nn

zcentre

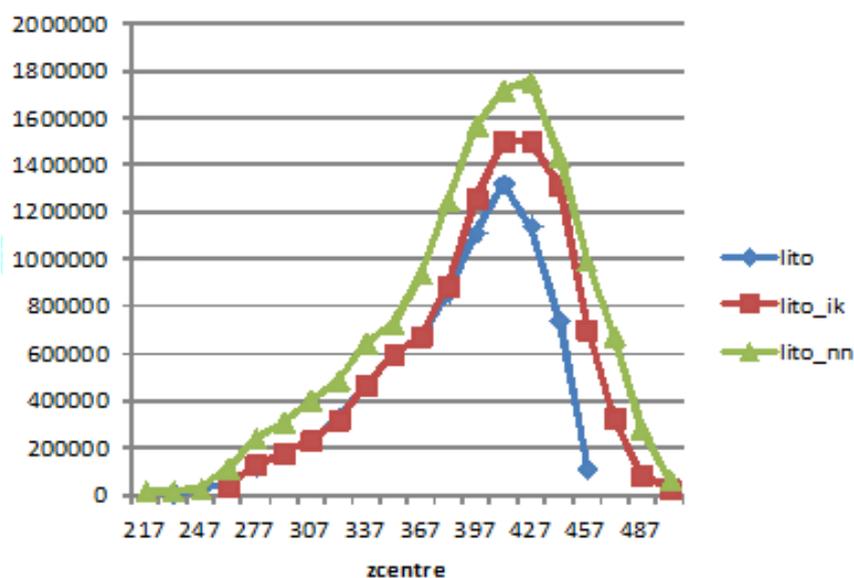
Figura 11-9).



Legenda:

Litologia

Figura 11-8 – Comparação entre a seção vertical geológica interpretada (SV_13) e a mesma seção no modelo de blocos



lito
lito_ik
lito_nn

zcentre

Figura 11-9 – Comparação volumétrica entre lito (atributo final do litotipo), Lito_ik (estimativa por IK) e Lito_nn (estimativa por NN) da hematita friável do modelo N3

11.4.2.4. N4 – Litotipos

Análise variográfica de indicadores

O estudo variográfico do modelo N1 foi realizado a partir da análise de um único variograma para todos os indicadores, com base na hipótese de que os indicadores teriam correlação intrínseca, ou seja, seus variogramas teriam a mesma faixa e variariam apenas na escala vertical (soleira). Todas as etapas da variografia foram realizadas com a ajuda do software Vulcan® e Isatis®. Amostras/intervalos de banco de dados de controle de minério e exploração foram utilizados para a análise variográfica.

A escolha dos litotipos dos compósitos que participaram da variografia como variável binária foi: 1 para litotipos HF, HC e HMN e 0 para litotipos CE, CQ, FMN, JP, MS, MSD, MS. Os três tipos de litotipos máficos são diferentes na forma de ocorrência, seja dique (DK: MDDK, MSDDK, MSDK) ou soleira (SL: MDSL, MSDSL, MSSL), além da ocorrência como rocha hospedeira (topo e base da formação ferrífera, MD, MSD, MS). No entanto, para a estimativa litológica, os grupos máficos são consolidados. Assim, temos o grupo de máfica decomposta (MD), que compreende MD, MDDK, MDSL, o grupo de máfica semidecomposta (MSD), que compreende MSD, MSDDK, MSDSL, e o grupo de máfica sã (MS), que compreende MS, MSDK, MSSL.

Setores estruturais

Para o modelo de mina N4, foram criados quatro setores estruturais, que foram atribuídos no modelo de blocos, numerados de 1 a 4. Os setores 1 e 2 representam a estrutura principal do corpo de N4E, e os setores 3 e 4, a estrutura principal de N4W. Na estimativa, foram utilizados elipsoides de busca horizontal para as rochas hospedeiras máficas e decapeamento. A orientação dos elipsoides varia de acordo com o setor, com diferentes inclinações para litotipos de formação ferrífera e soleiras máficas. Para os diques, a inclinação de 310° e 75° de azimute foi utilizada.

Interpolação de indicadores

Na construção do modelo de blocos do indicador litológico, a etapa inicial é a geração do modelo de blocos de litologias de resíduos a partir da construção de sólidos 3D com base nas seções verticais interpretadas utilizando o software Vulcan®. Os sólidos foram construídos utilizando o

software Leapfrog®. Após essa etapa, a estimativa dos indicadores litológicos é realizada dentro do limite definido como formação ferrífera.

Para validar a estimativa de krigagem, foi adotado o método de NN. Neste estágio, os mesmos parâmetros utilizados na krigagem foram reproduzidos na estimativa de NN. Os planos de estimativa foram criados para que o modelo de blocos respeitasse a seção interpretada (1bsec) e as informações de sondagem (1bflp). Esses planos são explicados na Tabela 11-5 e Tabela 11-6.

Tabela 11-5 - Lista de litotipos modelados por 3D e os estimados por IK

Litotipo	Modelagem 3D	IK	Indicador de Litotipo
AG	x		
CQ	x	x	icg
CE	x	x	ice
HF		x	ihf
HC		x	ihc
HMN		x	ihmn
FMN		x	ifmn
JP		x	ijp
MD	x	x	imd
MDDK	x	x	imddk
MDSL		x	imdsl
MSD	x	x	imsd
MSDDK	x	x	imsddk
MSDSL		x	imsdsl
Interface		x	ims
MSDK	x	x	imsdk
MSSL	x	x	imssl

Tabela 11-6 - Parâmetros de estimativa do indicador litológico

Parâmetros		Krigagem	NN	1bflp	1bfcf	1bsec
Amostras	Bancos de dados	Sn4sn4.cik.isis				
	Grupo	15MFLP/15MFCF/SEC		15MFLP	15MFCF	SEC
	Mín. de amostras	1	1	1	1	1
	Máx. de amostras	16	1	1	1	1
	Octante	Sim	-	-	-	-
Blocos	Discretização	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	-	-	-
	Intervalo de pesquisa (m)	400 x 300 x 100		12,5 x 12,5 x 7,5		
	Setorização	Sim		-	-	-

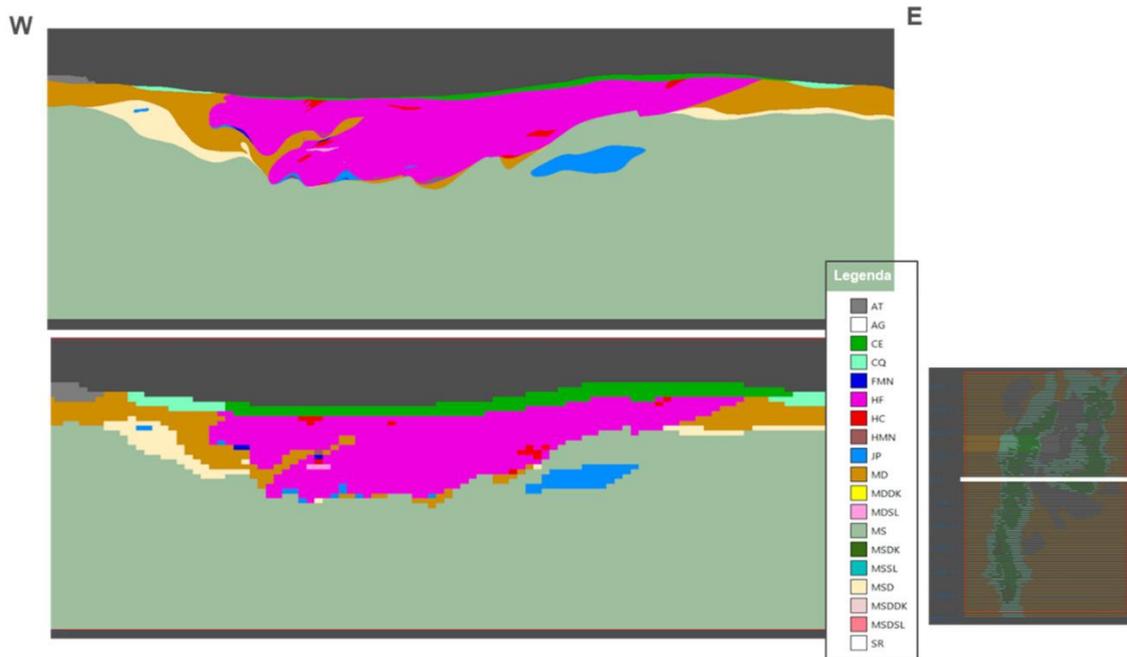
Validação

Para validar a variável "lito" estimada por IK, são utilizados os mesmos procedimentos que em N1: resumo da estimativa, verificação visual (Figura 11-10), blocos vazios, blocos de sinalização e NN de análise de desvio (Legenda:

Lito
Lito_ik
Lito_nn_ff

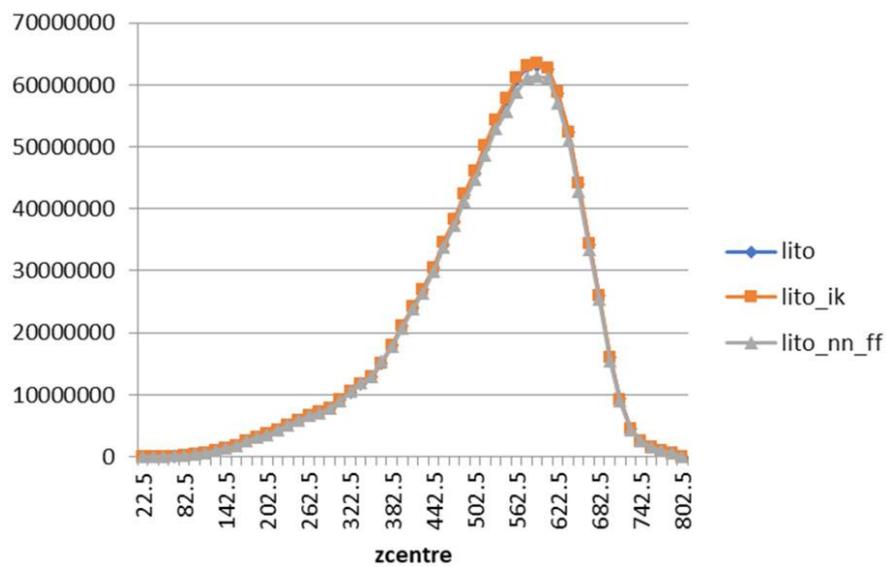
zcentre

Figura 11-11).



Legenda

Figura 11-10 - Comparação entre a seção vertical geológica interpretada (SV_0100N) e a seção do modelo de blocos



Legenda:

Lito
Lito_ik
Lito_nn_ff

zcentre

Figura 11-11 – Comparação volumétrica entre lito (litotipo identificado final), lito_ik (estimativa por IK) e lito_nn_ff (estimativa por NN) da hematita friável do modelo de mina N4

11.4.2.5. N5 – Litotipos

Análise variográfica de indicadores

O estudo variográfico do modelo N5 foi realizado a partir da análise de um único variograma para todos os indicadores, com base na hipótese de que os indicadores teriam correlação intrínseca, ou seja, seus variogramas teriam a mesma faixa e variariam apenas na escala vertical (soleira). Todas as etapas da variografia foram realizadas com a ajuda do software Vulcan® e Isatis®. Amostras/intervalos de banco de dados de longo e curto prazo foram usados para a análise variográfica.

A escolha dos litotipos dos compósitos que participaram da variografia como variável binária foi: 1 para litotipos HF, HC, HMN, FMN, JP, CE e 0 para litotipos MS, MSD, MD, MDDK, MSDDK, MSDK, MDSL, MSDSL, MSSL, CQ, CQL. Os três tipos de litotipos máficos são diferentes na forma de ocorrência, seja dique (DK: MDDK, MSDDK, MSDK) ou soleira (SL: MDSL, MSDSL, MSSL), além da ocorrência como rocha hospedeira (topo e base da formação ferrífera, MD, MSD, MS).

Setores estruturais

Devido à complexidade dos contatos litológicos, a estratégia de busca convencional, que considera ângulos de busca fixos, não foi aplicada. O método de anisotropia dinâmica foi selecionado para estimar o modelo N5 cuja orientação elipsoide de busca segue diferentes azimutes e mergulhos que melhor representam o comportamento litológico. Foram identificados três domínios: um estrutural, um supergênico e o setor externo. Para os setores estrutural e supergênico, as superfícies que melhor representam o comportamento litológico interpretado nas seções verticais foram utilizadas como base. Para regiões fora das superfícies de controle, foi utilizada a direção geral do variograma.

As informações que permitem valores dinâmicos de anisotropia, azimute e inclinação para cada bloco são obtidas usando superfícies guia. Essas superfícies são compostas por um grande número de pequenos triângulos e com a ajuda de scripts, é possível calcular os componentes vetoriais de cada um, criando um banco de dados cujas coordenadas dos pontos são os pontos centrais de cada triângulo e as variáveis são os componentes vetoriais. Esses componentes são estimados nos blocos e é feito um cálculo para converter os valores dos componentes vetoriais em azimutes e inclinações. Finalmente, no momento da estimativa, o software identifica quais valores de azimute e inclinação estão presentes no bloco a ser estimado e os aplica no processo de estimativa. As informações de azimute e inclinação são registradas no modelo de blocos como uma variável de guia com o prefixo "dyna" seguido da abreviação que representa as superfícies de controle.

Interpolação de indicadores

A krigagem ordinária foi usada para estimar os indicadores litológicos, com cada litotipo estimado por IK representando uma variável de indicador, totalizando 17 variáveis (icgl, ice, icq, ifmn, ihc, ihf, ihm, ijp, imd, imddk, imdsl, imsd, imsdck, imsdsl, ims, imsdk, imssl). Somente as litologias de aterro (AT) e a formação ferrífera provenientes de N4 foram atribuídas por sólidos, todas as outras foram estimadas usando krigagem indicadora.

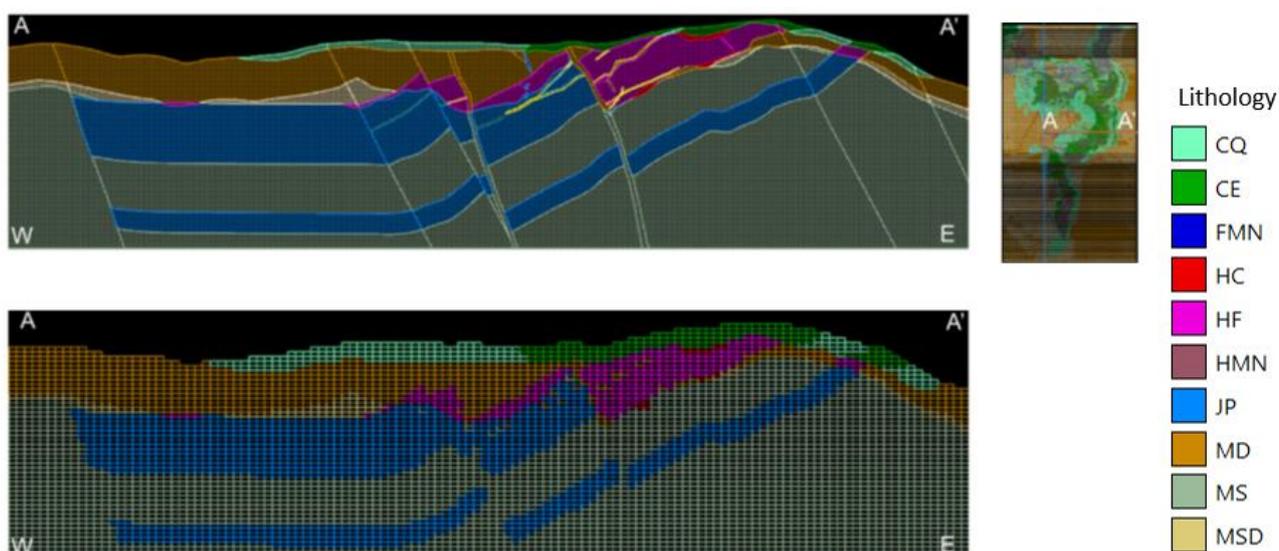
Para validar a estimativa de krigagem, foi adotado o método de NN. Neste estágio, os mesmos parâmetros utilizados na krigagem foram reproduzidos na estimativa de NN. Os planos de estimativa foram criados para que o modelo de blocos respeitasse a seção interpretada (1bsec) e as informações de sondagem (1bflp, sondagem de longo prazo; 1bfcp, sondagem de curto prazo) além dos mapas de curto prazo (1bmap). Esses planos são explicados na Tabela 11-7.

Tabela 11-7 - Parâmetros de estimativa do indicador litológico

Parâmetros		Krigagem	NN	1bflp	1bfcP	1bsec	1bmap	
Amostras	Bancos de dados	N5N5.cik.isis						
	Grupo	15MFLP/15MFCP/SEC/MAP		15MFLP	15MFCP	SEC	MAP	
	Mín. de amostras	1	1	1	1	1	1	
	Máx. de amostras	16	1	1	1	1	1	
	Octante	Sim	-	-	-	-	-	
Blocos	Discretização	1 x 1 x 1	1 x 1 x 1	-	-	-	-	
	Intervalo de busca (m)	540 x 490 x 45			15 x 15 x 9			
	Setorização	Sim			-	-	-	

Validação

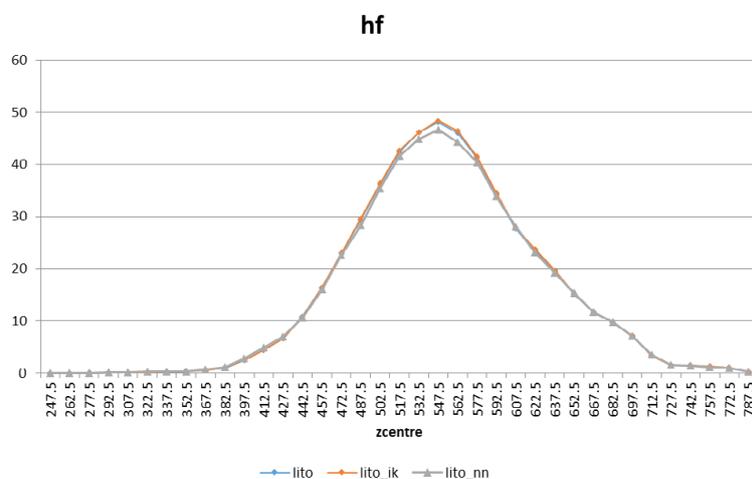
Para validar a variável "lito" estimada por IK, são utilizados os mesmos procedimentos que em N1: resumo da estimativa, verificação visual (Figura 11-12), blocos vazios, blocos de sinalização e NN de análise de desvio (Figura 11-13).



Legenda:

Litologia

Figura 11-12 – Comparação entre a seção vertical geológica interpretada e a seção no modelo de blocos



Legenda:

Zcentre
Lito
Lito_ik

Figura 11-13 – Comparação volumétrica entre lito (identificação do litotipo final, no modelo de blocos), lito_ik (estimativa IK) e lito_nn (estimativa NN) para hematite friável do modelo de mina N5

11.5. Modelagem de domínio

11.5.1. Metodologia

Para a modelagem de domínio, uma definição de litotipos é considerada usando bancos de dados geológicos, mapas geológicos de mina e mapeamentos regionais como referências.

O banco de dados contém informações referentes às sondagens com descrições geológicas visuais macroscópicas dos testemunhos de sondagem e uma variável de classificação visual (CLV), de acordo com os padrões internos da Vale. Os mesmos critérios são usados para descrição geológica em bancos de dados que incluem amostragem de mina.

A partir da descrição visual (CLV) dos intervalos que compõem o banco de dados geológico e os litotipos macroscopicamente identificados na mina, a partir de mapeamentos de superfície, é feita a definição dos litotipos que serão modelados. No estágio de modelagem, a definição de zonas geológicas relativamente homogêneas é realizada em que os contatos são bem definidos e marcados por descontinuidades mineralógicas, químicas e/ou granulométricas.

Uma chave de classificação matemática (CLM) é gerada para definir os litotipos que serão modelados com base nas características visuais, mineralógicas, químicas e granulométricas, buscando a assinatura de cada litotipo. Estudos são realizados com análise estatística (histogramas, análise de agrupamento, análise de contato, etc.) para definir a classificação matemática.

Um exemplo de chave de classificação matemática para a Serra Norte é mostrado na Tabela 11-8 e Figura 11-14.

Tabela 11-8 - Chave de classificação matemática da Serra Norte

Litotipo		Teor de ferro	Teor de manganês	G1 (>8mm)
CE - Cobertura de minério		>=55%		
CQ - Cobertura química		<55%		
HF - Hematita friável		>=60%	<2%	<50%
HC – Hematita compacta		>=60%	<2%	>=50%
HMN – Hematita manganésifera		>=55%	>=2%	
JP – Jaspilito		<60%	<2%	
FMN – Ferro-manganês		<55%	>=2%	

Os contatos entre os tipos de formação ferrífera são geralmente bem definidos, com diferenças acentuadas nos teores e/ou compacidade que definem os litotipos. A Figura 11-14 mostra um detalhe de uma seção geológica vertical com um exemplo das diferenças nos teores e tamanhos de partículas dos litotipos.

A Figura 11-15 mostra uma análise de contato entre dois litotipos (HF e JP), na qual é calculada a média dos teores de Fe em relação à distância ao contato.

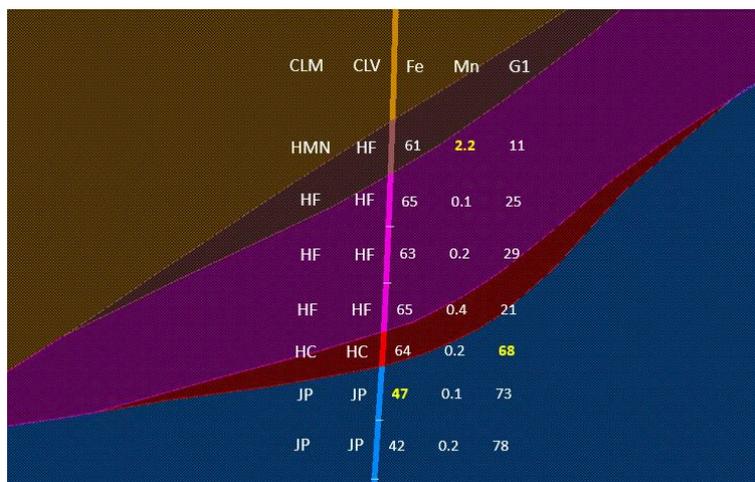
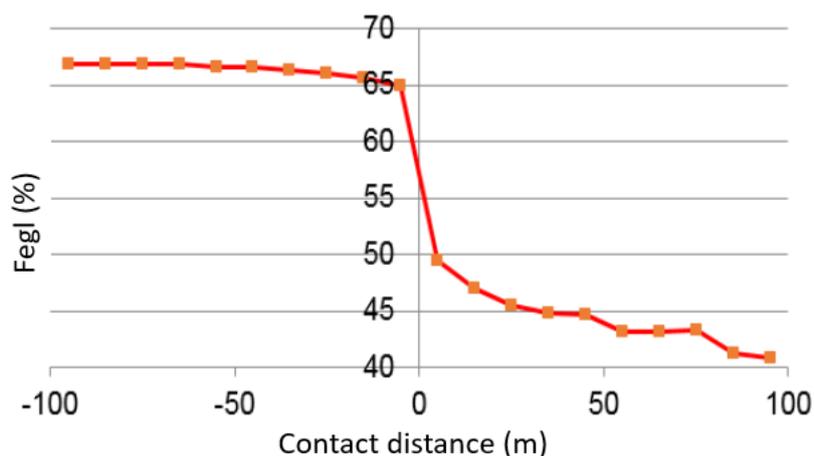


Figura 11-14 - Detalhe do furo de sondagem na seção geológica vertical mostrando as classificações visual (CLV) e matemática (CLM), teores de ferro (Fe) e manganês (Mn) e as porcentagens de massa retida em G1 (>8 mm), nos diferentes litotipos (mudanças bruscas nos valores indicam a presença de contato).



Legenda:

Fegl (%)
Distância de contato (m)

Fegl (%)
Contact distance (m)

Figura 11-15 - Média global de Fe na região de contato entre hematita friável (HF) e jaspilito (JP)

A partir da compatibilidade da classificação visual dos litotipos (CLV), suas características químicas e granulométricas (CLM) e do contexto geológico de cada intervalo, os litotipos são modelados e classificados sob um código de "classificação interpretada", denominado CLI. CLI representa a classificação do litotipo de acordo com a interpretação do modelo geológico, considerando caracterização visual, mineralógica, química e granulométrica, além do contexto geológico.

A Figura 11-16 mostra as classificações interpretada (CLI), matemática (CLM) e visual (CLV), o teor de ferro (Fe) e manganês (Mn) e as porcentagens de massa retida na fração de granulometria G1 (> 8 mm), em perfurações de uma seção geológica vertical. A Classificação Interpretada (CLI) corresponde à classificação final de cada intervalo/amostra com identificação do litotipo, conforme interpretado no modelo.

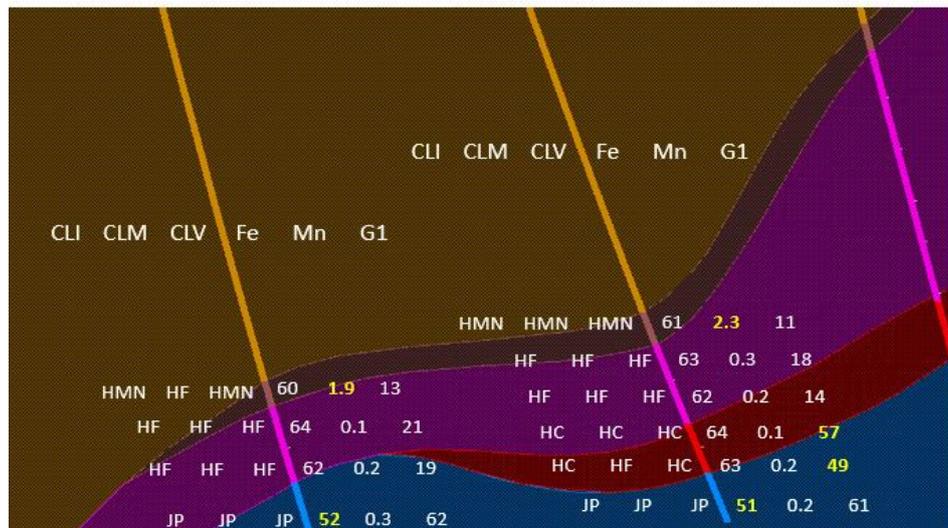


Figura 11-16 - Detalhe de uma seção geológica vertical mostrando as classificações interpretada (CLI), matemática (CLM) e visual (CLV), além dos teores de ferro (Fe) e manganês (Mn) e porcentagens de massa retida no G1 (> 8 mm).

11.5.2. Litotipos modelados da Serra Norte

Os diferentes tipos de formação ferrífera e rochas hospedeiras do distrito da Serra Norte são descritos abaixo. Os teores médios mencionados referem-se aos teores das amostras (ponderados pelo comprimento) de cada litotipo modelado nesta revisão, considerando a classificação interpretada (CLI).

As cangas representam um produto do intemperismo nas sequências de rocha típicas da região. Para modelagem, são divididas em dois tipos diferentes: canga estrutural (CE) com teores de ferro maiores ou iguais a 55%, produtos da desagregação da formação ferrífera e canga química (CQ), que está cobrindo as rochas máficas.

Canga química (CQ) – representa as crostas ferro-aluminosas que normalmente cobrem as rochas máficas decompostas. Possui uma textura colóide e alta porosidade. Muitas vezes tem um alto teor de Al₂O₃GL, evidenciado pela coloração clara de gibbsita e minerais de argila. Fragmentos de hematita são escassos ou ausentes. Em geral, o teor de ferro é inferior a 55%, com fósforo elevado e Al₂O₃GL.

Canga estrutural (CE) – termo comumente usado pela Vale para designar crostas lateríticas ferruginosas. Geralmente está localizada sobre afloramentos de minério de ferro *in situ*. Também ocorre como canga transportada, mas a uma curta distância da área de origem, sendo um bom indicador da localização dos corpos de minério. A espessura é variável, atingindo mais de 20 metros. Possui teor de ferro acima de 55% e teores relativamente baixos de Al₂O₃GL e fósforo, permitindo assim sua potencial utilização como minério de ferro.

Jaspilito (JP) – formação ferrífera bandada, geralmente de fácies de óxido, composta por bandas alternadas de minerais opacos, como hematita (predominantemente), magnetita ou martita, e bandas avermelhadas ou brancas compostas por jaspe e/ou sílex. Os cristais de hematita ocorrem principalmente na forma de hematita microcristalina e lamelar, além de martita e magnetita, sendo a magnetita incomum e geralmente martitizada, com relictos de kenomagnetita (Lobato et al. 2005). O jaspilito é cinza avermelhado e representa o protore dos depósitos de ferro de Carajás. Ocorre predominantemente na base das formações ferríferas, em contato com rochas máficas ou como lentes, imersas em uma grande massa de hematita friável. A espessura das lentes costuma ser pequena (alguns metros), variando de centímetros a cerca de 20 m. O jaspilito na porção basal pode atingir até 350 m de espessura, a continuidade em profundidade em algumas regiões da mina é desconhecida. Na grande massa de jaspilito, que constitui a base da formação ferrífera, as lentes de hematita, mais comumente hematita friável, são observadas em regiões próximas ao contato superior de jaspilito/hematita.

Hematita friável (HF) – é o tipo predominante de minério, ocorrendo em todas as minas de Serra Norte. É comumente bandada, mostrando localmente os planos de laminação primária. Consiste em um material de hematita cinza friável com brilho metálico e alta porosidade. Pode ser pulverulento ou desagregado em pequenos fragmentos (placoides ou não).

Os cristais de hematita ocorrem principalmente na forma de hematita microcristalina, lamelar, anédrica-subédrica e euédrica-subédrica, além de martita, como pseudomorfos de magnetita (Lobato et al. 2005). Ela é formada predominantemente pelo enriquecimento supergênico do protominério (jaspilitos). Possui espessura variável no perfil de enriquecimento, atingindo até 350 m e grande continuidade ao longo da inclinação.

Hematita compacta (HC) – um material rico em ferro e, como as HFs, gerado pela alteração do intemperismo do jaspilito. A sua cor varia de preto a castanho avermelhado, esta última típica para cimentação de goethita/limonita, que se entende ser responsável pela elevada compacidade deste litotipo. A HC ocorre de forma subordinada em todo o depósito, como lentes dentro da grande massa de hematita friável, geralmente com espessuras em torno de 5 a 10 m, sem considerável continuidade lateral (algumas dezenas de metros). Localmente, pode atingir espessuras de até 50 m. A cor da HC é cinza azulada com brilho metálico. É densa, com baixa porosidade, e pode ser bandada, caracterizada pelo bandamento original do jaspilito preservado, definido por camadas compactas alternando com camadas porosas ou brechadas. Este litotipo também pode ser maciço, com a textura original destruída, composta por agregados de cristais de hematita. O teor de Fe está entre 59 e 69%. Al_2O_3GL representa um contaminante importante nesta litologia.

Hematita manganesífera (HMN) – A cor da hematita manganesífera é cinza escuro fosco, ocorre em lentes com espessuras que variam de 5 a 10 m, e localmente, pode atingir espessuras de 60 m, sem muita continuidade lateral, dispersa na massa de hematite friável. A HMN é um material rico em Fe com teor de Mn superior a 2% (global). Geralmente é posicionada na base dos corpos de hematita, uma provável zona de acúmulo de Mn lixiviada dos horizontes erodidos.

Ferro manganesífero (FMN) – É um material que, aparentemente representa um produto intermediário da alteração da desagregação do jaspilito, enriquecido em Mn. Ocorre como lentes pequenas (geralmente alguns metros de espessura, atingindo até 30 m), com pouca continuidade lateral, dentro da massa de hematita friável.

Rochas máficas - Elas são as rochas hospedeiras da formação ferrífera, ocorrendo tanto na base quanto no topo da mesma. Elas são representadas pelas rochas máficas do Grupo Grão Pará, as formações Parauapebas (fundo) e Igarapé Cigarra (topo), de acordo com Macambira (2003). As rochas máficas correspondem principalmente a basaltos. Para fins de modelagem geológica, não foram classificadas nas referidas unidades estratigráficas, sendo consideradas apenas como rochas máficas, discriminadas em máfica decomposta (MD), máfica semidecomposta (MSD) e máfica sã (MS). Além de sua ocorrência como rocha hospedeira (topo e base da formação ferrífera), elas também ocorrem como soleiras e diques máficos em formações ferríferas.

Máfica decomposta (MD) – Apresenta alto grau de alteração, mal estruturado, com coloração variando de avermelhada a amarelada, argilosa, com consistência predominantemente mole.

Máfica semidecomposta (MSD) – É um termo intermediário entre MS e MD, às vezes ainda apresentando relictos da textura original da rocha, mas já com profunda transformação mineralógica, e conseqüentemente, em sua coloração.

Máfica sã (MS) – rocha não afetada pelo intemperismo, sistematicamente cloritizada e correspondendo ao produto da hidratação de basaltos e diabásios. Sua coloração é verde escura, às vezes com estruturas vulcânicas típicas, como amígdalas de quartzo. Variações composicionais e até mesmo sedimentos clásticos e químicos não ferrosos foram agrupados sob este nome para simplificar as interpretações geológicas.

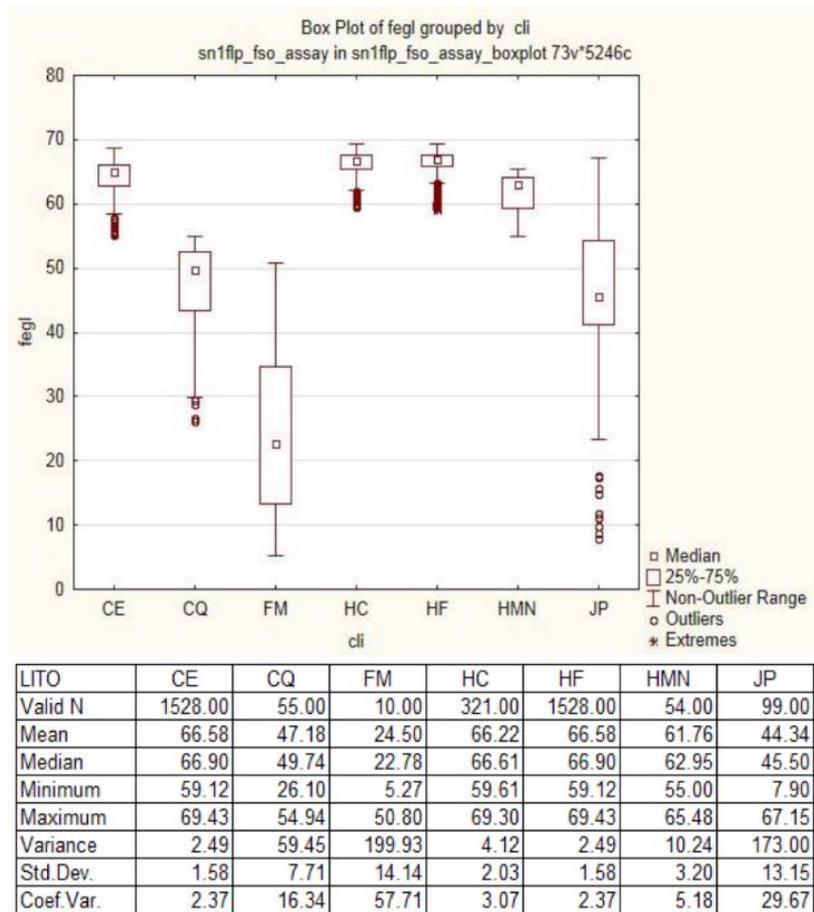
11.6. Análise de recursos

11.6.1. Análise de dados exploratórios

A Vale realizou análise exploratória de dados (EDA) para cada domínio de estimativa, incluindo estatística univariada, histogramas, gráficos de probabilidade cumulativa; box plots para comparar

estatísticas de domínio de geologia e gráficos de contato para investigar perfis de teor entre domínios de estimativa.

O box-plot mostrando a distribuição do ferro global (FEGl) e as estatísticas descritivas dos principais litotipos modelados no depósito N1 é apresentado a seguir (Figura 11-17) como exemplo.



Legenda:

Box Plot de fegl agrupado por cli
sn1flp_fso_assay in sn1flp_fso_assay_boxplot 73v*5246c

fegl

Mediana
125%-75%
Faixa Não Outlier
Outliers
Extremos

LITO
N Válido
Média
Mediana
Mínimo
Máximo
Variância
Desvio Padrão
Coef.Var.

Box Plot of fegl grouped by cli
sn1flp_fso_assay in sn1flp_fso_assay_boxplot 73v*5246c

fegl

Median
125%-75%
Non-Outlier Range
Outliers
Extremes

LITO
Valid N
Mean
Median
Minimum
Maximum
Variance
Std. Dev.
Coef.Var.

Figura 11-17 - Gráfico box-plot e estatísticas descritivas de teores globais de Fe

11.7. Tratamento de ensaios de alto teor

Valores anômalos foram tratados separadamente no processo de estimativa. Para este propósito, foi aplicado um corte de outliers no banco de dados a partir da análise estatística da distribuição de teores (histogramas, gráficos de frequência cumulativa). Os blocos estimados como outliers foram aqueles localizados dentro do elipsoide de tamanho 150 x 75 x 15 metros para HC e 200 x 100 x 15 metros para HF. A orientação do elipsoide respeitou a orientação definida para o domínio que contém o bloco. Para os blocos atribuídos como outliers, o processo de estimativa usa todo o banco de dados (sem restrição de banco de dados), mas para os blocos que não foram atribuídos como outliers, apenas amostras caracterizadas como “OUT” foram usadas.

11.8. Composição

Para os processos de análise variográfica e estimativa de teores, o banco de dados foi submetido a um processo de isotopia e posterior regularização em compósitos de 15 m. Os intervalos de sondagem são regularizados respeitando a altura da bancada da mina e os contatos litológicos. O método adotado para regularização (compósitos) é o padrão Vulcan, que respeita o comprimento constante pré-estabelecido e os contatos litológicos. O limite de aceitação de intervalos divididos (residuais) durante a regularização na etapa de estimativa de teor é de 30% da altura da bancada. A soma de todos os intervalos divididos é inferior a 2% da metragem total no banco de dados.

11.9. Análise de Tendências

11.9.1. Análise de continuidade espacial de teores – N1

Análises variográficas foram feitas para adquirir os parâmetros necessários para estimar os teores por meio do Modelo de Correlação Intrínseca (IMC). Para este propósito, o variograma experimental FEGL foi calculado e, a partir do modelo de variograma dessa variável, foram obtidos os parâmetros (variância e faixas) para o IMC, assumindo que as variáveis tenham correlação intrínseca.

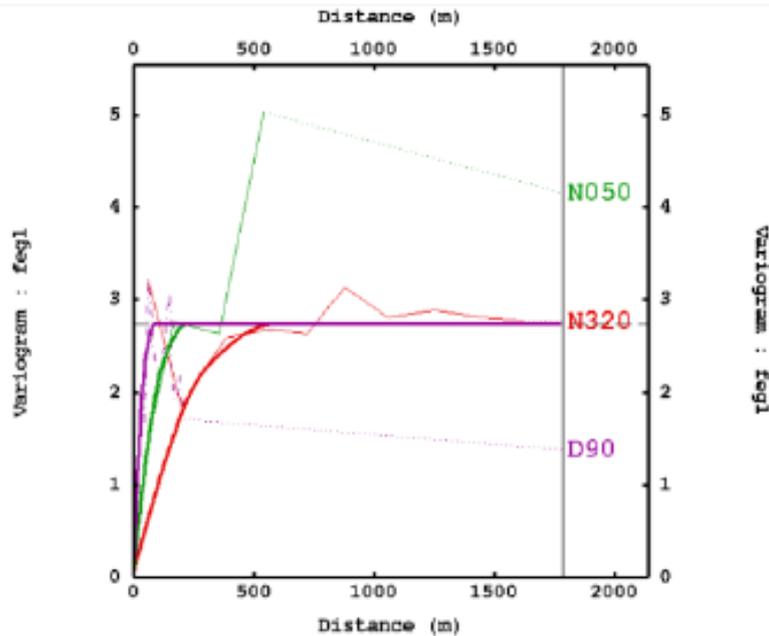
Em seguida, foram obtidos os seguintes variogramas experimentais cruzados, bem como seus respectivos modelos:

- Teores globais (Fe, Si, P, Al, Mn e LOI), totalizando 36 variogramas cruzados e diretos.
- Frações (porcentagem retida) + valores acumulados de Fe, Si, P, Al, Mn e LOI das frações G1A, G1B, G2 e G3, totalizando 28 variáveis que resultam em 784 variogramas cruzados e diretos.

Após a criação dos 784 modelos variográficos, eles foram ajustados com base nas faixas e proporções das variâncias obtidas no modelo variográfico FEGL. Os modelos variográficos ajustados foram posteriormente verificados graficamente para validação e verificação de quaisquer impactos que este procedimento possa resultar. Os parâmetros Isatis® utilizados em variogramas experimentais e modelos variográficos são os seguintes:

- Bancos de dados;
- Seleção;
- Arquivos de parâmetros Isatis do variograma experimental;
- Arquivos de parâmetros do modelo variográfico Isatis;
- Direção de variogramas experimentais e modelos variográficos (específicos para cada depósito):
 - Azimute, Mergulho e Caimento;
 - Tolerância angular;
 - Passos;
 - Número de passos.

A Figura 11-18 mostra um exemplo, com o modelo de variograma FEGL usado para IMC de hematitas em N1. Este modelo variográfico foi utilizado para estimar os litotipos: CE, CQ, HF, HC, HMN, FM, JP, MD, MS. O litotipo MSD não foi estimado, pois não havia resultados analíticos suficientes para estimar essa litologia.



Isatis

Legenda:

Distância (m)
Variograma: fegl

Distance (m)
Variogram: fegl

Distância (m)
Variograma: fegl

Distance (m)
Variogram: fegl

Figura 11-18 - Modelo variográfico FEGL para estimativa de teor, exemplo de depósito N1

11.10. Estratégia de pesquisa e análise de interpolação de teores

11.10.1. Interpolação de teores

A interpolação de teores foi realizada utilizando o princípio de (co)krigagem ordinária de modelos variográficos de correlação intrínseca (ICM). Conforme explicado acima, com base no método, tanto a krigagem independente da variável quanto a (co)krigagem têm os mesmos resultados, pois os variogramas são proporcionais. Para a estimativa, foram utilizados sills normalizados. Essa padronização dos sills é uma simplificação do método que viabiliza o processo de estimativa para software com base em módulos básicos de geoestatística. O modelo N1 foi estimado no módulo Geostats (algoritmos GSLIB) do software Vulcan.

Nove variáveis globais (Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, PF, TiO₂, MgO e Cao) e 36 variáveis granulométricas acumuladas pelas 4 frações granulométricas foram estimadas. Além disso, foram estimadas as 4 frações granulométricas (G1A (+19 mm), G1B (-19+8 mm), G2 (-8+0,15 mm) e G3 (-0,15 mm).

Embora o agrupamento litológico tenha sido utilizado para ajustar o modelo variográfico, as unidades litológicas foram respeitadas no processo de krigagem, ou seja, compostos de certos litotipos estimam apenas blocos do mesmo litotipo.

No modelo N1, foram estimados 09 domínios litológicos distintos: CE, CQ, HF, HC, HMN, FM, JP, MD e MS.

No modelo N2, foram estimados 09 domínios litológicos distintos: CE, CQ, HF, HC, HMN, JP, FMN, IN e MD. Para MD, os blocos estimados são limitados aos contatos com a formação ferrífera, pois se destinam a ser usados somente no cálculo de diluição. Assim, foi gerado um banco de dados auxiliar com os centroides dos blocos de hematita e jaspilito, e a partir deste teor foram atribuídos

os blocos de máfica decomposta (MD) dentro de um raio de 60 x 60 x 30 m com o teor estimado de NN.

No modelo N3, foram estimados 7 domínios litológicos separados: CE, CQ, HF, HC, HMN, JP e FMN. Devido ao pequeno número de amostras de rochas máficas, estas não foram estimadas.

Nos modelos N4 e N5, foram estimados 08 domínios litológicos distintos: CE, CQ, HF, HC, HMN, FMN, JP e MD.

Parâmetros de estimativa

A Tabela 11-9 apresenta a lista de parâmetros adotados para a estimativa dos teores do modelo N1. Para todos os litotipos de formação ferrífera (hematitas, jaspilitos e cangas), os blocos estimados são de 25 x 25 x 15 m, mas para os litotipos máficos de resíduos, foram estimados alguns blocos de tamanho 100 x 100 x 15 m. A Tabela 11-10 apresenta a lista de parâmetros adotados para a estimativa dos teores de N2.

Tabela 11-9 - Parâmetros utilizados na estimativa dos teores globais e granuloquímica do modelo N1

Parâmetros		(co) Krigagem Global e granulo-química		Vizinho Mais Próximo Global e granuloquímica	
		P1	P2	P1	P2
Amostras	Bancos de dados	Sn1flp_1215.cac.isis			
	Mín. de amostras	1		1	
	Máx. de amostras	16		1	
	Octante	Sim		Não	
	Peso	Comprimento >= 4,5 m		Comprimento >= 4,5 m	
	Tratamento de outliers	Sim		Sim	
Blocos	Discretização	5 x 5 x 2		1 x 1 x 1	
	Intervalo de busca (m)	450 x 150 x 50	4500 x 1500 x 500	450 x 150 x 50	4500 x 1500 x 500
	Tamanho do bloco	25 x 25 x 15		25 x 25 x 15	
	Nº de setores estruturais	7		7	

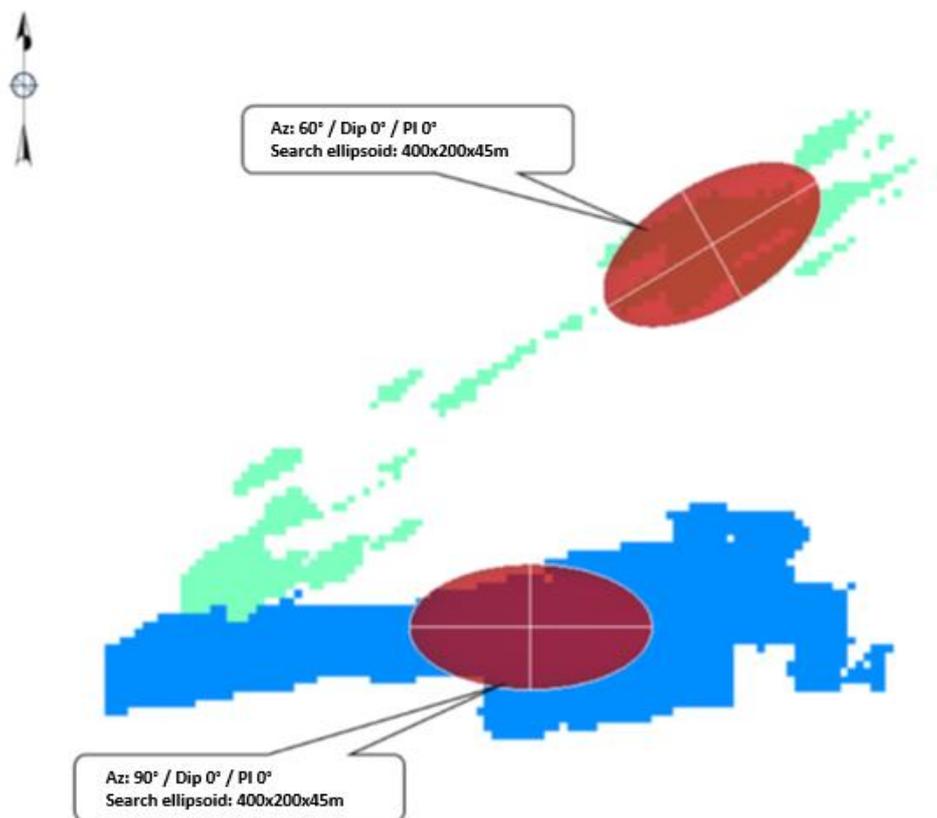
P1 – Primeiro passo da estimativa; P2 - Segundo passo da estimativa

Tabela 11-10 - Parâmetros adotados na estimativa dos teores do modelo N2

Parâmetros		(co) Krigagem Global e granulo-química		Vizinho Mais Próximo Global e granuloquímica	
		GL + P1	P2	GL + P1	P2
Amostras	Bancos de dados	N2_flp.fac.isis			
	Mín. de amostras	1		1	
	Máx. de amostras	16		1	
	Octante	Sim		Não	
	Peso	Comprimento >= 4,5 m		Comprimento >= 4,5 m	
	Tratamento de outliers	Sim		Sim	
Blocos	Discretização	5 x 5 x 2		1 x 1 x 1	
	Intervalo de busca (m)	200 x 100 x 30	2000 x 1000 x 300	200 x 100 x 30	2000 x 1000 x 300
	Tamanho do bloco	25 x 25 x 15		25 x 25 x 15	
	Nº de setores estruturais	1		1	

GL - Estimativa da química global; P1 – Primeiro passo da estimativa; P2 - Segundo passo da estimativa

Para o modelo N3, dois setores foram definidos para a estimativa do teor em função da geometria do depósito: um na direção E-W e o outro, NE-SW. Os variogramas e elipsoides de busca para cada setor são girados seguindo as principais direções de continuidade (Figura 11-19).



Legenda:

Az: 60° / Inclinação 0° / Queda 0°
Elipsoide de busca: 400x200x45m

Az: 60° / Dip 0° PI 0°
Search ellipsoid: 400x200x45m

Az: 90° / Inclinação 0° / Queda 0°
Elipsoide de busca: 400x200x45m

Az: 90° / Dip 0° / PI 0°
Search ellipsoid: 400x200x45m

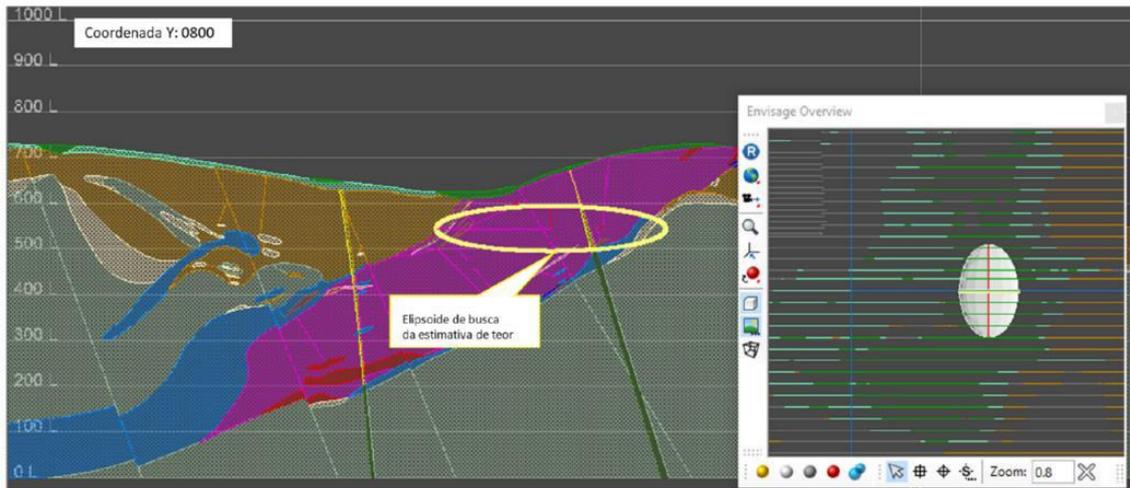
Figura 11-19 - Parâmetros de busca para o modelo N3

A Tabela 11-11 apresenta a lista de parâmetros adotados para a estimativa de teor do modelo N4, a Figura 11-20 ilustra a orientação do elipsoide de busca para estimativa de teor.

Tabela 11-11 - Parâmetros utilizados na estimativa do teor global e granulométrica do modelo N4

Parâmetros		(co) Krigagem Global e granulométrica		Vizinho Mais Próximo Global e granulométrica	
		GL + P1	P2	GL + P1	P2
Amostras	Bancos de dados	Sn4sn4.cac.isis			
	Mín. de amostras	1		1	
	Máx. de amostras	16		1	
	Octante	Sim		Não	
	Peso	Comprimento >= 4,5 m		Comprimento >= 4,5 m	
	Tratamento de outliers	Sim		Sim	
Blocos	Discretização	5 x 5 x 2		1 x 1 x 1	
	Intervalo de busca (m)	400 x 250 x 50	4000 x 2500 x 500	400 x 250 x 50	4000 x 2500 x 500
	Tamanho do bloco	25 x 25 x 15		25 x 25 x 15	
	Setorização	Sim		Sim	

GL - Estimativa da química global; P1 – Primeiro passo da estimativa química das frações de tamanho; P2 - Segundo passo da estimativa química das frações de tamanho



Legenda:

Coordenada Y: 0800

Elipsoide de busca da estimativa de teor

Visualizar Visão Geral

Coordenada Y: 0800

Elipsoide de busca da estimativa de teor

Envisage Overview

Figura 11-20 - Elipsoide de busca para estimar teores da mina N4

A Tabela 11-12 apresenta a lista de parâmetros adotados para a estimativa de teores do modelo N5 e a Figura 11-21 ilustra a orientação do elipsoide de busca para estimativa de teor.

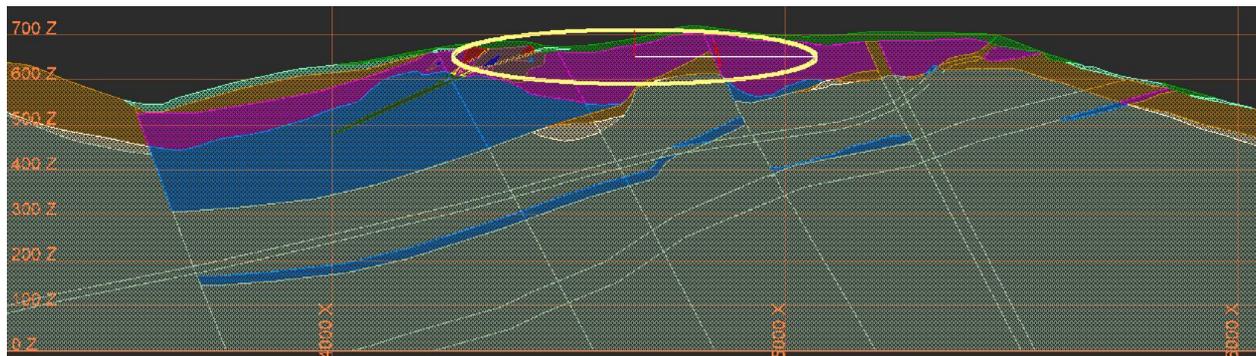


Figura 11-21 - Elipsoide de busca dos teores estimados da mina N5, Norte-4200

Tabela 11-12 - Parâmetros utilizados na estimativa de teores globais e granuloquímica do modelo N5

Parâmetros		(co) Krigagem Global e granulo-química		Vizinho Mais Próximo Global e granuloquímica	
		GL + P1	P2	GL + P1	P2
Amostras	Bancos de dados	n5n5.cac.isis			
	Mín. de amostras	1		1	
	Máx. de amostras	16		1	
	Octante	Sim		Não	
	Peso	Comprimento >= 4,5 m		Comprimento >= 4,5 m	
	Tratamento de outliers	Sim		Sim	
Blocos	Discretização	5 x 5 x 2		1 x 1 x 1	
	Intervalo de busca (m)	400 x 200 x 60	4000 x 2000 x 600	400 x 200 x 60	4000 x 2000 x 600
	Tamanho do bloco	25 x 25 x 15		25 x 25 x 15	
	Setorização	Sim		Sim	

GL - Estimativa da química global; P1 – Primeiro passo da estimativa química das frações de tamanho; P2 - Segundo passo da estimativa química das frações de tamanho

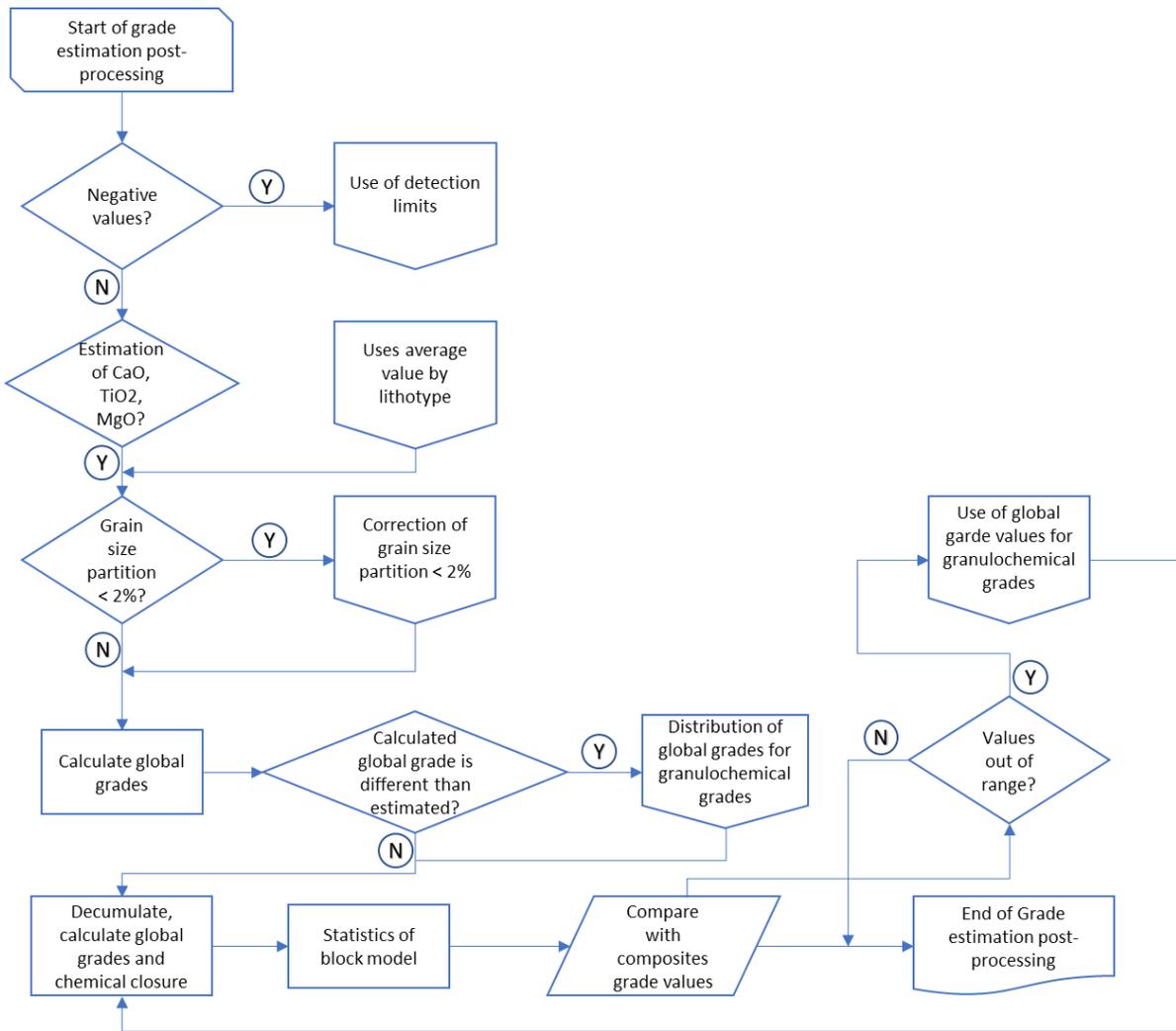
Processo de krigagem

Uma característica marcante na história da aquisição de dados nos depósitos de Carajás é a diversidade de fluxos de preparação de amostras e os métodos analíticos adotados. Assim, a desproporção entre a quantidade de dados de química global, ao contrário dos dados de química por frações granulométrica, resulta em um banco de dados heterotópico que requer uma série de adaptações aos planos de krigagem, bem como cálculos adicionais no estágio pós-processo. Neste trabalho, foram estimados os dados de química global e granuloquímica, estas últimas em duas etapas: no primeiro passo (P1), realizada com os mesmos raios de busca que a estimativa de química global, e o segundo passo (P2), com raios de busca 10 vezes maiores que o primeiro. Isso é necessário porque existem regiões do modelo onde predominam amostras que contêm apenas dados de química global. Portanto, alguns blocos têm os teores globais estimados, mas ainda sem granulometria e dados de química por fração. O motivo do segundo passo (P2) é complementar os dados de tamanho de partícula desses blocos.

Após o final do processo de estimativa, a etapa de pós-processamento foi iniciada. O pós-processamento é feito seguindo o fluxo exemplificado na

Figura 11-22, onde as seguintes verificações foram feitas:

- Existência de blocos com teores negativos: a correção foi aplicar o teor estimado de NN para a granuloquímica e o limite de detecção para os teores negativos no Mn, Ti, Mg e Ca global. A fração do tamanho de partícula G1A foi definida como "0", quando aplicável;
- Tratamento de blocos sem teores estimados de CaO, MgO e TiO₂: como resultado do banco de dados heterotópico utilizado na estimativa, os blocos não tiveram teores estimados de CaO, MgO e TiO₂. A correção foi feita considerando-se os teores médios dos blocos estimados para cada litotipo e o fechamento químico para cada fração. Nos casos em que o fechamento químico foi igual ou superior a 100%, foram aplicados os limites de detecção laboratorial. Quando o fechamento químico foi menor, a diferença foi proporcionalmente distribuída entre as 3 variáveis;
- Compatibilidade da química das frações de granulometria com a global estimada;
- Identificação e correção de valores anômalos de fechamento estequiométrico: foram marcados blocos com valores inferiores a 95% e superiores a 105%. Nos blocos com desvios em relação ao fechamento estequiométrico para alguma fração, os teores estimados na fração granulométrica foram substituídos pelos teores globais estimados;
- A identificação e a correção de teores de Fe acima do máximo, por fração e teor global, do banco de dados foram realizadas.



Início do pós-processamento da estimativa de teor						
Valores negativos?	S	Uso de limites de detección				
N						
Estimativa de CaO, TiO ₂ , MgO?		Usa o valor médio por litotipo				
S						
Partição granulométrica < 2%?	S	Correção da partição granulométrica < 2%				Uso de valores de teores globais para teores granuloquímicos
N					S	
Calcular teores globais		Teor global calculado é diferente do estimado?	S	Distribuição de teores globais para teores granuloquímicos	N	Valores fora do intervalo?
		N				
Desacumular, calcular os teores globais e o fechamento químico		Estatísticas do modelo de blocos		Comparar com valores de teor de compostos		Final do pós-processamento da estimativa de teor

Start of grade estimation post processing					
Negative values?	Y	Use of detection limits			
N					
Estimation of CaO, TiO ₂ , MgO?		Uses average value by lithotype			
Y					
Grain size partition < 2%?	Y	Correction of grain size partition < 2%			Use of global grade values for granulochemical grades
N					Y
Calculate global grades		Calculated global grade is different than estimated?	Y	Distribution of global grades for granulochemical grades	N Values out of range?
		N			
Decumulate, calculate global grades and chemical closure		Statistics of block model		Compare with composites grade values	End of Grade estimation post processing

Figura 11-22 - Fluxograma de pós-processamento da estimativa de teor

11.11. Densidade Aparente

Amostras coletadas por métodos diretos de densidade convencional (deslocamento de volume, preenchimento de volume, frasco de areia e pesagem hidrostática) e perfis geofísicos gama-gama de furo de sondagem foram utilizados para determinar as densidades dos diferentes litotipos das minas da Serra Norte. Os dados do levantamento gama-gama foram validados pela equipe de geofísica da área de Geologia e Sondagem de Ferrosos e pela área de Recursos Minerais Ferrosos. Os valores médios ponderados pelo número de amostras são representativos da densidade de cada litotipo (Tabela 11-13 a Tabela 11-17). A ponderação considerou os resultados de perfilagem geofísica gama-gama e/ou testes diretos convencionais.

A umidade é obtida secando uma alíquota da amostra e comparando a massa seca e úmida da amostra. A importância dessa determinação é que, para avaliações das minas de ferro da Vale, as medições de tonelagem são feitas com a densidade na base natural, considerando a massa de água livre obtida a partir das medições de umidade.

Tabela 11-13 - Resumo das densidades de depósito N1

Litotipo	Medidores/Amostras	Densidade Natural (g/cm ³)	Método
Canga Estrutural - CE	3,15 metros	3,32	GG
Canga Química - CQ	12,64 metros	2,80	GG
Hematita Compacta - HC	12 amostras	3,81	DV
Hematita Friável - HF	16,41 metros	3,03	GG
Hematita Mn – HMN	4,13 metros	3,24	GG
Jaspilito – JP	38,24 metros	2,92	GG
Ferro Manganêsífero - FM	17,42 metros	3,20	GG
Máfica Desgastada – MD	177,33 metros	2,67	GG
Máfica Semidesgastada – MSD	39,86 metros	2,87	GG
Máfica - MS	302,98 metros	2,91	GG

Métodos: GG – Perfilagem geofísica gama-gama; DV – Deslocamento de volume. / Nota: Umidade determinada somente para HC (0,29%).

Tabela 11-14 - Resumo das densidades e umidades do depósito de N2

Litotipo	Medidores/Amostras	Densidade Natural (g/cm ³)	Umidade (%)	Método
Canga Estrutural - CE	25,84 metros	3,17	3,47	GG
Canga Química - CQ	8,87 metros	2,66	9,21	GG
Hematita Compacta - HC	25 amostras	3,90	1,17	DV
Hematita Friável - HF	74,97 metros	3,28	6,92	GG
Hematita Mn – HMN	19 amostras	3,15	7,10	PV
Jaspilito – JP	49,53 metros	3,32	0,33	GG
Ferro Manganêsífero - FM	5,24 metros	3,14	10,18	GG
Máfica Desgastada – MD	211 amostras	1,88	22,02	PV
Máfica Semidesgastada – MSD	25 amostras	2,35	11,01	PV
Máfica - MS	156 amostras	2,89	0,10	DV
Quartzito - QT	316,02 metros	2,38	0,10	GG

Métodos: GG – Perfilagem geofísica gama-gama; DV – Deslocamento de volume; PV – Preenchimento de Volume / Obs.: * Quartzito: Foram considerados os valores médios da Mina de N2 - Modelo N4_0316, exceto para o Quartzito (QT): levantamento geofísico gama-gama em um furo de sondagem no depósito de N2

Tabela 11-15 - Resumo das densidades e umidades do depósito de N3

Litotipo	Medidores/Amostras	Densidade Natural (g/cm ³)	Umidade (%)	Método
Canga Estrutural - CE	25,84 metros	3,17	3,47	GG
Canga Química - CQ	8,87 metros	2,66	9,21	GG
Hematita Compacta - HC	25 amostras	3,90	1,17	DV
Hematita Friável - HF	74,97 metros	3,28	6,92	GG
Hematita Mn – HMN	19 amostras	3,15	7,10	PV
Jaspilito – JP	49,53 metros	3,32	0,33	GG
Ferro Manganêsífero - FM	5,24 metros	3,14	10,18	GG
Máfica Desgastada – MD	211 amostras	1,88	22,02	PV
Máfica Semidesgastada – MSD	25 amostras	2,35	11,01	PV
Máfica - MS	156 amostras	2,89	0,10	DV
Xisto - XI	-	1,88	22,02	PV

Métodos: GG – Perfilagem geofísica gama-gama; DV – Deslocamento de volume; PV – Preenchimento de Volume / Obs.: * xisto: adotou o mesmo valor que a máfica decomposta (MD). / Os valores médios da mina N4 – Modelo N4_0316 foram considerados

Tabela 11-16 - Resumo das densidades e umidades do mina N4

Litotipo	Amostras	Densidade Natural (g/cm ³)	Umidade (%)
Canga Estrutural - CE	399	3,22 ^{*3}	4,39
Canga Química - CQ	137	2,71 ^{*3}	7,18
Hematita Compacta - HC	1008	3,59 ^{*3}	1,01
Hematita Friável - HF	7827	3,24 ^{*3}	6,15
Hematita Mn – HMN	283	3,16 ^{*3}	7,14
Jaspilito – JP	4524	3,10 ^{*3}	0,22
Ferro Manganífero - FM	11	3,06 ^{*3}	10,53
Máfica Desgastada – MD	3551	2,27 ^{*3}	22,51
Máfica Semidesgastada – MSD	621	2,39 ^{*3}	0,10
Máfica - MS	7361	2,73 ^{*3}	0,10
Argila – AG ^{*1}	-	2,27	-
Aterro – AT ^{*2}	-	2,00	-

*1 Adotou o valor MD do litotipo. / *2 Valor Histórico. / *3 Média ponderada dos valores obtidos por levantamento geofísico gama-gama e métodos convencionais de densidade, utilizando o número de amostras/compósitos como peso.

Tabela 11-17 - Resumo das densidades e umidades para a mina N5

Litotipo	Amostras	Densidade Natural (g/cm ³)	Umidade (%)
Canga Estrutural - CE	176	2,96	4,82
Canga Química - CQ	495	2,62	10,47
Hematita Compacta - HC	170	3,65	0,82
Hematita Friável - HF	151	3,30	8,22
Hematita Mn – HMN	24	3,00	11,06
Jaspilito – JP	3357	3,43	0,10
Ferro Manganífero - FM	1	3,01	10,49
Máfica Desgastada – MD	4257	2,23	18,36
Máfica Semidesgastada – MSD	181	2,32	-
Máfica - MS	777	2,85	0,10
Aterro – AT ^{*1}	-	2,00	-
Conglomerado ²	-	2,48	10,47

*1 Considerados os valores históricos. / *2 Valor relativo ao CQ por métodos convencionais.

11.12. Modelos de blocos

As superfícies de N1 foram preenchidas com blocos no software Vulcan. O modelo de blocos foi subdividido em limites de superfície com células-mãe medindo 100 m por 100 m por 100 m e tamanho mínimo de subcélula de 25 m por 25 m por 15 m. A configuração do modelo de blocos é mostrada na Tabela 11-18.

Tabela 11-18 - Configuração do Modelo de Blocos de N1

Parâmetro	X	S	Z
Origem (m)	578584	9327842	10
Orientação/Mergulho/Caimento	52	0	0
Tamanho do Bloco (m)	100	100	15
Tamanho Mín. do Sub-Bloco (m)	25	25	15
Número de blocos	72	92	66

As superfícies de N2 foram preenchidas com blocos no software Vulcan. O modelo de blocos (SN2_0616_LP.BMF) não era subdividido em limites de superfície em um único esquema com células-mãe medindo 25 m por 25 m por 15 m. A configuração do modelo de blocos é mostrada na Tabela 11-18.

Tabela 11-19 - Configuração do Modelo de Blocos de N2

Parâmetro	X	S	Z
Origem (m)	582163	9329760	150
Orientação/Mergulho/Caimento	90	0	0
Tamanho do Bloco (m)	25	25	15
Tamanho Mín. do Sub-Bloco (m)	25	25	15
Número de blocos	95	78	56

As superfícies de N3 foram preenchidas com blocos no software Vulcan. O modelo de blocos foi subdividido em limites de superfície com células-mãe medindo 25 m por 25 m por 15 m e tamanho mínimo de subcélula de 12,5 m por 12,5 m por 15 m. A configuração do modelo de blocos é mostrada na Tabela 11-20.

Tabela 11-20 - Configuração do Modelo de Blocos de N3

Parâmetro	X	S	Z
Origem (m)	584738	9331110	200
Orientação/Mergulho/Caimento	90	0	0
Tamanho do Bloco (m)	25	25	15
Tamanho Mín. do Sub-Bloco (m)	12,5	12,5	15
Número de blocos	174	116	40

As superfícies de N4 foram preenchidas com blocos no software Vulcan. O modelo de blocos foi subdividido em limites de superfície com células-mãe medindo 100 m por 100 m por 15 m e tamanho mínimo de subcélula de 25 m por 25 m por 15 m. A configuração do modelo de blocos é mostrada na Tabela 11-21.

Tabela 11-21 - Configuração do Modelo de Blocos de N4

Parâmetro	X	S	Z
Origem (m)	588420,02	9331110,7	10
Orientação/Mergulho/Caimento	82,64	0	0
Tamanho do Bloco (m)	100,04	100,04	15
Tamanho Mín. do Sub-Bloco (m)	25,01	25,01	15
Número de blocos	65	103	60

As superfícies de N5 foram preenchidas com blocos no software Vulcan. O modelo de blocos não era subdividido em limites de superfície em um único esquema com células-mãe medindo 25 m por 25 m por 15 m. A configuração do modelo de blocos é mostrada na Tabela 11-22.

Tabela 11-22 - Configuração do Modelo de Blocos de N5

Parâmetro	X	S	Z
Origem (m)	593799,21	9320695,16	10

Orientação/Mergulho/Caimento	83,64	0	0
Tamanho do Bloco (m)	25,01	25,01	15
Tamanho Mín. do Sub-Bloco (m)	25,01	25,01	15
Número de blocos	212	376	60

A RPM revisou o modelo de blocos em 2016 e opinou que os tamanhos de bloco são apropriados, com base no espaçamento de sondagem e método de lavra proposto, e são adequados para suportar a estimativa de Recursos Minerais e Reservas Minerais.

11.13. Valor líquido de retorno e valor de corte

O cálculo do teor de corte econômico considera o preço de venda do metal, processamento mineral, custos comerciais, de mineração, de processamento, de transporte e marketing, recuperação da planta de processo e teor. O teor de corte não é definido como uma questão do próprio teor de ferro, mas como uma abordagem tecnológica em cada estágio de produção e recuperação da planta de processamento para estimar os Recursos Minerais e as Reservas Minerais. A decisão de explorar um bloco específico será determinada na geração da cava final devido ao preço do produto e a todos os custos relacionados.

Cada recuperação e destino de litologia de minério são definidos por equações de processamento que irão buscar litologias total ou parcialmente inclusos na rota de processamento operacional do local da Vale ou que tiveram uma rota de processamento testada com sucesso no nível do projeto/estudo.

11.14. Classificação

11.14.1. Classificação de inventário mineral

Os inventários minerais dos modelos de blocos para depósitos de minério de ferro da Vale são classificados com base no cálculo do "Índice de Risco" (IR), que segue o método de classificação originalmente proposto por Amorim e Ribeiro (1996) e posteriormente reformulado por Ribeiro et al. (2010).

Metodologia do índice de risco

O método do Índice de Risco usa um único índice, combinando continuidade geológica, medida pela krigagem indicadora (IK) de "minério", e erro de estimativa, medido pela variância da krigagem indicadora (σ^2_{IK}), para classificar os blocos em medidos, indicados e inferidos. O IR é calculado pela equação a seguir, que representa a simplificação da equação original de 1996:

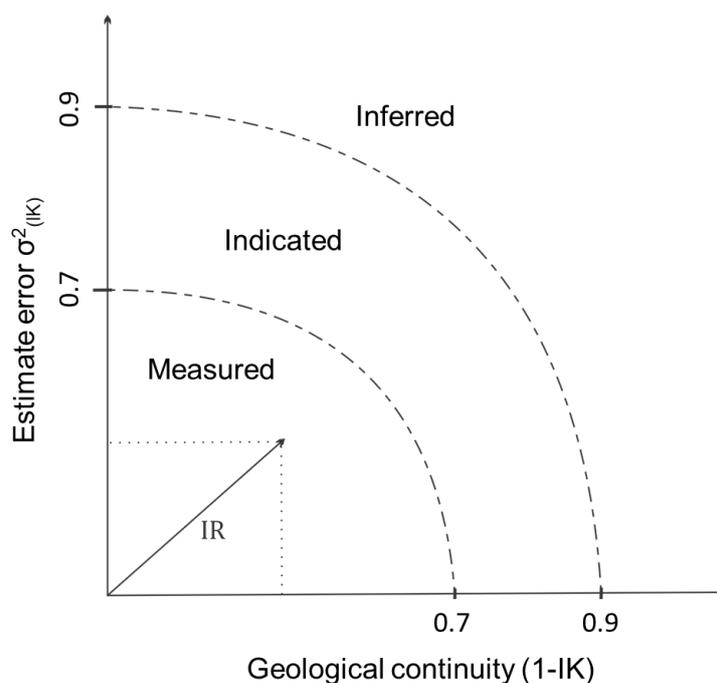
$$IR(u) = \sqrt{[1 - I_k(u)]^2 + [\sigma_{IK}^2(u)]^2}$$

onde:

$I_k(u)$ - é o indicatriz estimada pela krigagem, associado ao apoio de determinado bloco, localizado na posição u ;

$\sigma_{IK}^2(u)$ - é a variância da krigagem da indicatriz do bloco na posição u , utilizando um modelo de semivariograma normalizado, com sill unitário.

A representação gráfica do IR pode ser vista na Figura 11-23. O eixo horizontal representa a continuidade geológica como $1 - I_k(u)$. O eixo vertical é o erro de estimativa, $\sigma_{IK}^2(u)$. O IR do vetor e os limites usados para a classificação, em blocos medidos, indicados e inferidos.



Legenda:

Erro estimado σ (IK)

Inferido
Indicado
Medido

IR

Continuidade geológica (1-IK)

Estimate error σ (IK)

Inferred
Indicated
Measured

IR

Geological continuity (1-IK)

Figura 11-23 - Representação gráfica do cálculo de IR e limites de classe

A validação do método (IR), incluindo os Índices de Risco escolhidos, é realizada comparando-o com outro método de classificação: o método de dilatação e erosão. O método de dilatação e erosão é um método geométrico no qual, em geral, os blocos pertencentes à malha de 100 x 100 m são considerados medidos, indicados para uma malha de 200 x 200 m, e os outros blocos com teores estimados são considerados como inferidos.

11.14.2. Classificação do inventário mineral da Serra Norte

Os depósitos de Serra Norte utilizam um código binário, atribuindo 1 (um) aos intervalos de sondagem regularizados considerados "minério" (cangas e hematitas) e 0 (zero) para os litotipos considerados "estéril". Nos depósitos de N2 e N3, embora o jaspilito e o litotipo de ferro-manganês não sejam atualmente minérios, eles receberam o indicador 1 para a análise variográfica devido ao pequeno número de amostras na banco de dados. Para a estimativa, os indicadores desses litotipos foram atribuídos com zero (Tabela 11-23).

Tabela 11-23 - Indicadores utilizados para caracterizar as litologias consideradas como estéril e minério dos depósitos da Serra Norte

Depósito	Indicador 1 (minério)	Indicador 0 (resíduos)
N1	CE, HF, HC, HMN	CQ, FM, JP, MD, MSD, MS
N2	CE, HF, HC, HMN, JP, FMN	CQ, MD, MSD, MS, IN, QT
N3	CE, HF, HC, HMN, JP, FMN	CQ, MD, MSD, MS, XI

N4	CE, HF, HC, HMN	CQ, FMN, JP, MD, MDSL, MDDK, MSD, MSDSL, MSDDK, MS, MSSL, MSDK, AG
N5	CE, HF, HC, HMN	CQ, FMN, JP, MD, MDSL, MDDK, MSD, MSDSL, MSDDK, MS, MSSL, MSDK, AG

A classificação e a krigagem de blocos de acordo com o Índice de Risco foram realizadas com o uso do software Vulcan®. Os raios do elipsoide de busca de amostra para a construção da matriz de krigagem de blocos foram 450 x 150 x 50 m para N1, 200 x 100 x 30 m para N2, 400 x 200 x 45 m para N3, 400 x 250 x 50 m para N4 e N5, nas três direções principais de continuidade. Essas distâncias correspondem a uma malha máxima aceitável para explorar recursos de minério de ferro no plano horizontal e aproximadamente três bancadas de extrapolação na direção vertical. Para a estimativa, foram utilizados os compósitos dos bancos de dados de sondagem de exploração e controle de minério para N4 e N5. Para os depósitos N1, N2, N3, ainda em fase de desenvolvimento do projeto, foram utilizados apenas bancos de dados de sondagem de exploração. As direções de busca dos elipsoides foram as mesmas direções utilizadas para a estimativa de teores.

As amostras mínima e máxima foram de 1 e 16, respectivamente, considerando duas amostras por octante como ótimas e a discretização dos blocos foi de 4 x 4 x 2.

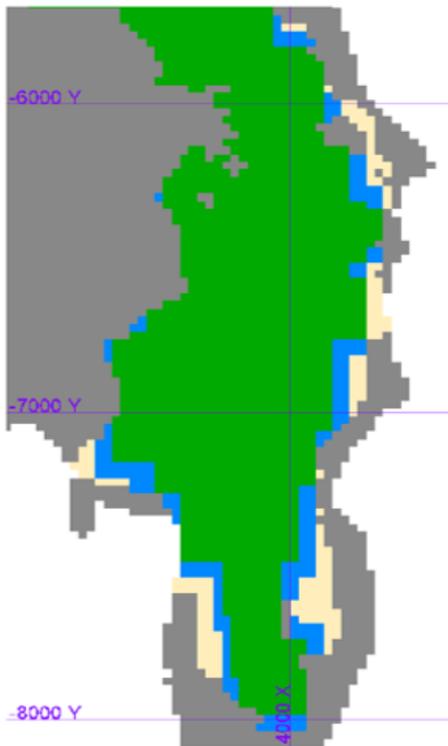
Após estimar a variável IK (indicador de Índice de Risco) e durante o processo, a variância IK para os blocos krigados (var_ik) foi obtida. A partir dessas variáveis, o Índice de Risco é calculado usando um script. A classificação segue estes critérios: medido para IR até 0,6, indicado para IR entre 0,6 e 0,9 (em geral) e inferido para IR acima de 0,9. Os índices são definidos analisando as texturas (visual) do modelo de blocos e comparando-as com um método auxiliar (método de dilatação e erosão).

A classificação final do medido, indicado e inferido foi condicionada para conter valores de teores válidos; caso contrário, o bloco é atribuído como "n" (potencial). Os blocos classificados como medidos, mas estimados por um único furo de sondagem, foram rebaixados para indicado.

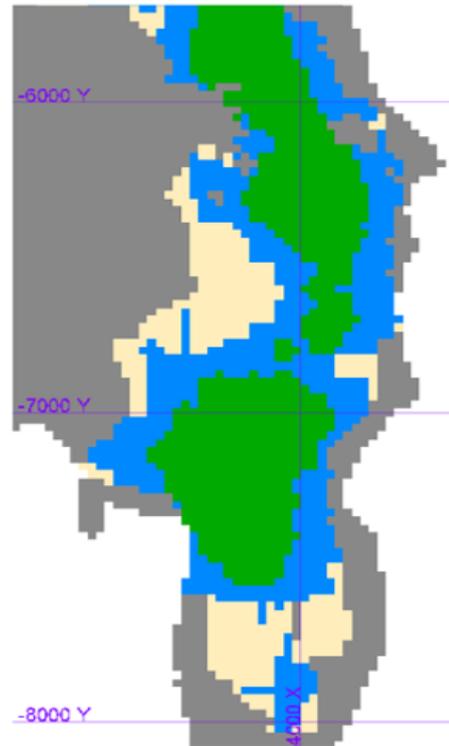
11.14.3. Validação da classificação de inventário mineral da Serra Norte

A validação da classificação de inventário mineral é feita principalmente por meio de verificação visual, em todo o modelo, em seções verticais e planas, para observar possíveis inconsistências e distorções do método. Outra técnica de validação usada é a comparação da classificação pelo método de Índice de Risco com a classificação tradicional por dilatação/erosão, da malha de sondagem, como pode ser observado em um exemplo, para N5 (Figura 11-25).

Geometric (dilation/erosion)



Risk Index



Medido
Indicado
Inferido
Não classificado
Índice de Risco

Geometric (dilation/erosion)
Measured
Indicated
Inferred
Not classified
Risk Index

Figura 11-24 - Comparação visual entre os métodos de classificação na elevação 525 na mina N5, região do Morro 1: dilatação/erosão (esquerda) e Índice de Risco (direita).

11.14.4. Inventário mineral da Serra Norte

O Inventário Mineral Classificado corresponde ao conjunto de blocos geológicos de formação ferrífera no inventário mineral que foi classificado em medido, indicado e inferido usando a metodologia do Índice de Risco, representando a menor incerteza geológica para o inventário medido e a maior para o inferido.

11.15. Validação do modelo de blocos

11.15.1. Validação de teores

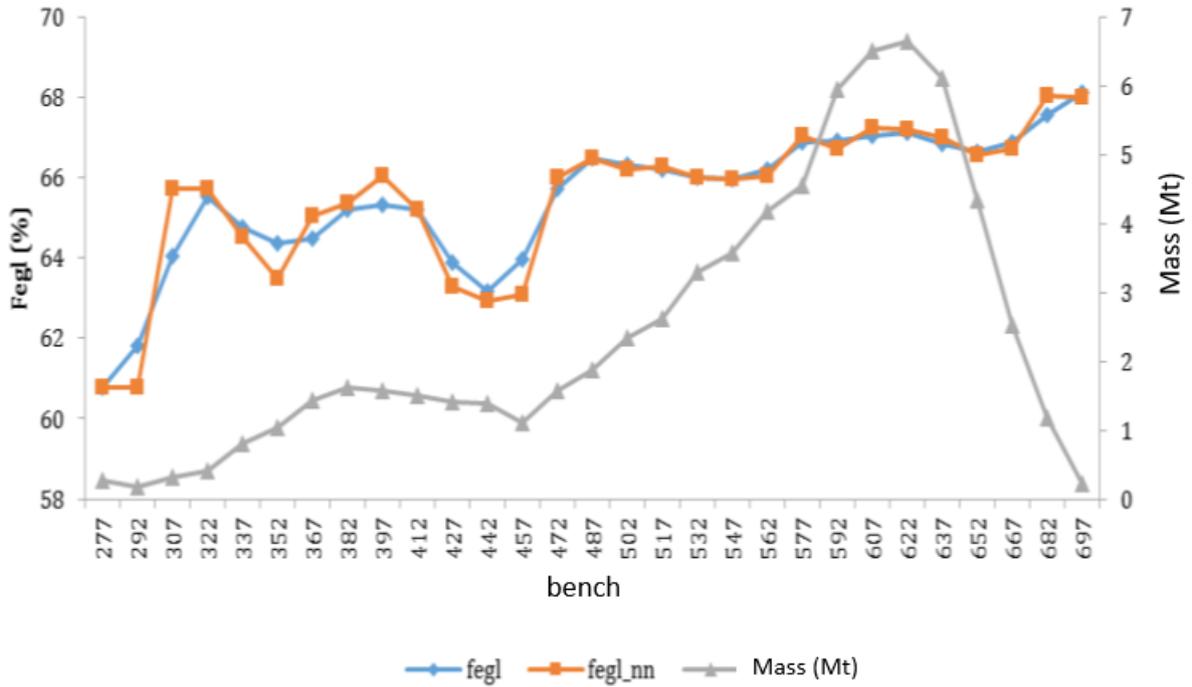
A validação do teor do modelo de blocos segue os procedimentos internos da Vale, para todos os depósitos na Serra Norte. As principais etapas de validação são descritas abaixo.

- Resumo dos planos de estimativa – esta verificação identifica se existem problemas com a estimativa que levaram à estimativa de um número diferente de blocos para o mesmo processo.
- Comprimento do Bloco – verifica se todos os blocos com teores estimados têm as mesmas dimensões (25x25x15m), comprovando que o modelo de blocos não foi corrompido durante o processo de estimativa.
- Faixa de amostragem – é feita por meio da análise estatística dos teores krigados em comparação com o arquivo de amostras regularizadas (Tabela 11-24).

Tabela 11-24 - Comparação entre teores estimados de krigagem e amostras regularizadas para N2

Litotipo	Variável	Bancos de dados			Modelo de Blocos			Diferenças	
		Nº	Mín.	Máx.	Nº	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
CE	FEGL	22	55680	66720	1270	55680	66720	0	0
CQ	FEGL	9	39668	53472	756	42173	53472	2505	0
HC	FEGL	20	61519	68062	107	62748	67814	1229	247
HF	FEGL	112	60767	68545	2294	60767	68533	0	12
HMN	FEGL	11	55293	64599	34	55293	63687	0	913
JP	FEGL	7	30157	59890	526	30157	59890	0	0
FMN	FEGL	3	30240	52430	6	30240	49477	0	2953

Análise de desvio – é uma verificação de enviesamento local e global, na qual um modelo de estimativa de “Vizinho Mais Próximo” é gerado, e os resultados são comparados globalmente por níveis de 15 m (altura da bancada). Alguns exemplos dessa validação são apresentados a seguir (Figura 11-25).

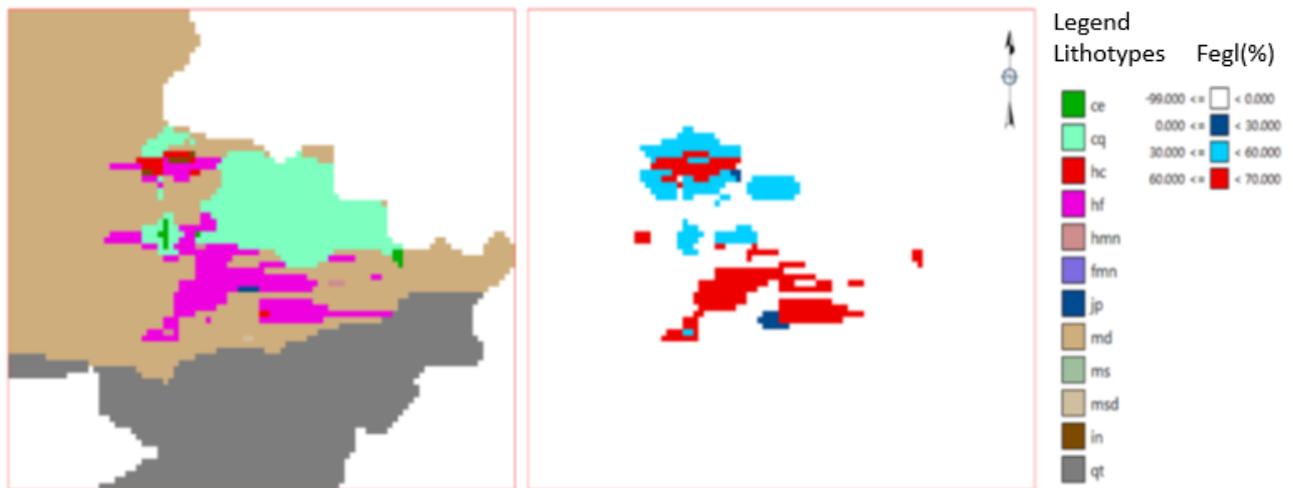


Legenda:
 FeI (%)
 Massa (Mt)
 Bancada
 FeI
 FeI_nn
 Massa (Mt)

FeI (%)
 Massa (Mt)
 Bench
 FeI
 FeI_nn
 Massa (Mt)

Figura 11-25 - Verificação global do enviesamento de ferro de hematitas friáveis (HF) para N2

Além da comparação global, verificações visuais também foram realizadas no modelo de blocos estimado (Figura 11-26).

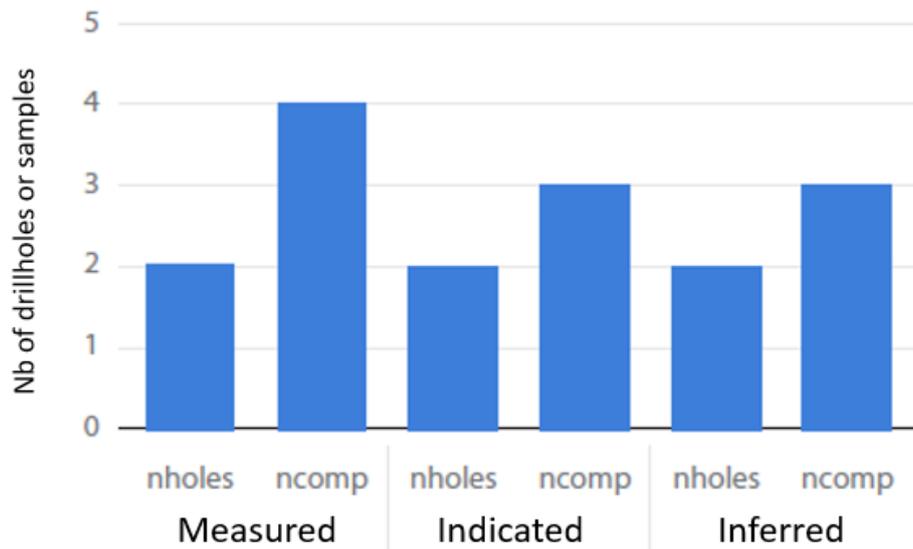


Legenda:
Legenda
Litotipos
Fegl (%)

Legend
Lithotypes
Fegl (%)

Figura 11-26 - Comparação visual do modelo geológico (esquerda) com os teores globais estimados de ferro (direita) para bancada 622,5

Densidade da amostra por classe de inventário mineral – os valores avaliados são o número médio de amostras utilizadas na estimativa de teores de blocos, por classe mineral (Figura 11-27).



N° de furos ou amostras

Nfuros
Ncomp

Medido
Indicado
Inferido

Nb of drillholes or samples

Nholes
Ncomp

Measured
Indicado
Inferido

11.16. Reporte de recursos minerais

11.16.1. Avaliação da Razoável Expectativa de Eventual Extração Econômica dos recursos minerais no corredor logístico norte

O Recurso Mineral não é o inventário de todas as mineralizações sondadas ou amostradas, independentemente dos teores de corte, dimensões prováveis da mina, localização ou continuidade. É um inventário de mineralização realista que, dependendo das condições técnicas e econômicas assumidas e justificadas, pode se tornar economicamente viável, no todo ou em parte.

Para esta avaliação, alguns parâmetros técnicos foram aplicados ao Inventário Mineral Classificado (método de lavra, geotecnia, engenharia de processo, restrições de unidades de conservação, restrições hidrogeológicas, espeleológicas e superficiais, direitos minerários, entre outros) e econômicos (custo e preço) para delimitação da massa que será declarada como Recurso Mineral.

O software NPV Scheduler (CAE ®) foi adotado para otimização de cava a céu aberto através do algoritmo de otimização de Lerch-Grossman, no qual as cavas matemáticas geradas buscam todas as formações ferríferas classificadas (medida, indicada e inferida) que apresentam razoabilidade de processamento mineral, método de lavra e infraestrutura associada a qualquer projeto mineral em um nível mínimo de estudo conceitual (FEL 1). Além disso, foram feitas análises de massas bloqueadas pelas principais restrições existentes neste depósito. Antes, durante e após a execução de todas essas etapas de otimização, são realizadas validações estatísticas dos litotipos, destinos de processamento mineral, parâmetros geotécnicos, custos, preços, equações de recuperação e qualidade do produto, além de validações visuais 2D e 3D.

11.16.2. Avaliação da Razoável Expectativa de Eventual Extração Econômica dos recursos minerais de Serra Norte (N1, N2, N3, N4 e N5)

O Recurso Mineral não é o inventário de todas as mineralizações perfuradas ou amostradas, independentemente dos teores de corte, dimensões prováveis da mina, localização ou continuidade. Em vez disso, é um inventário de mineralização realista que, dependendo das condições técnicas e econômicas assumidas e justificadas, pode se tornar economicamente viável, no todo ou em parte.

Para esta avaliação, alguns parâmetros técnicos foram aplicados ao Inventário Mineral Classificado (método de lavra, geotecnia, engenharia de processo, restrições de unidades de conservação, restrições hidrogeológicas, espeleológicas e superficiais, direitos minerários, entre outros) e econômicos (custo e preço) para delimitação da massa que será declarada como Recurso Mineral.

O software NPV Scheduler (CAE ®) foi adotado para otimização da cava a céu aberto utilizando o algoritmo de Lerch-Grossman. Antes, durante e após todas essas etapas de otimização, são realizadas validações estatísticas dos litotipos, destinos de processamento mineral, parâmetros geotécnicos, custos, preços, equações de recuperação e qualidade do produto, além de validações visuais 2D e 3D.

Parâmetros de preço e custo

Como premissa geral, foram adotadas as curvas de preço CIF de longo prazo da Vale (preço entregue na China), ajustadas pelo conteúdo de umidade, de acordo com a política de preços de longo prazo da empresa. A umidade média considerada do produto foi de 8,17% nesta análise de preço.

- Os preços dos produtos desses depósitos foram regularizados apenas com as curvas de teores de Fe acima de 60%, considerando que a Vale utiliza centros de associação na Ásia para vender seus produtos (BRBF – Brazilian Blend Fines);
- Os custos de mina foram definidos como o custo médio por tonelada lavrada (minério+estéril) calculado a partir das premissas de custos de mina e da movimentação de mina usados no Plano Diretor/Ciclo de Planejamento Estratégico de Metais Ferrosos;

- Os custos de processamento mineral foram definidos, no planejamento de mina a longo prazo do depósito, pelo custo médio por tonelada de ROM alimentada, registrado no Plano Diretor/Ciclo de Planejamento Estratégico;
- Os custos comerciais, incluindo logística, administração, etc., foram calculados pelos custos correntes médios e investimentos por tonelada de produto, desde os estoques das plantas de processamento mineral até o porto na China e foram devidamente utilizados para construir a cava final para definir os recursos minerais de cada depósito do Complexo Serra Norte.

Parâmetros do processo mineral

O modelo de blocos foi preenchido com um valor "NSR" que representa as qualidades e as respectivas recuperações em massa, bloco a bloco. Estes são obtidos a partir de equações fornecidas pela equipe de engenharia de processos da Vale. Devido à qualidade do material e como o processamento será baseado em umidade natural, a recuperação em massa foi inferida em 99,5%, que é o padrão para as atuais plantas de processamento no complexo de Mineração Serra Norte.

As equações buscam litotipos que são encaminhados, total ou parcialmente, para a rota de processamento operacional de um local da Vale, ou que tiveram uma rota de processamento testada com sucesso no nível de projeto/estudo, ou seja:

- ce: canga estrutural;
- hc: hematita compacta;
- hf: hematita friável;
- hmn: hematita manganésifera;
- Esses litotipos são agrupados nos seguintes grupos:
 - Hematitas (HEM): hc, hf, hgo e hmn;
 - Rolado (ROL): ce.

Parâmetros do método de lavra

Devido às características do depósito, que apresenta mineralização de ferro superficial a subsuperficial, baixa relação de minério/estéril e semelhança com depósitos já lavrados no Complexo de Mineração de Carajás, optou-se pelo método de lavra a céu aberto. Com base em estudos internos de reconciliação e operação, adotou-se que a recuperação da mineração é de 96% e a diluição operacional foi estabelecida em 1,35%. Quanto à otimização das reservas, considerou-se o custo adicional de aprofundamento de USD 0,0045/m.

O método de transporte de minério e estéril sugerido é por caminhões. No entanto, outros estudos de engenharia do projeto mineral serão necessários para avaliar as plantas de britagem mais próximas às cavas (britagem semimóvel), para reduzir DMT e seus custos operacionais relacionados.

Parâmetros geotécnicos

As avaliações de estabilidade de taludes têm o modelo geomecânico como seu ponto de partida considerado para o maciço rochoso da mina, com base em banco de dados geológico e estrutural. Essas informações são coletadas principalmente na descrição geológica-geotécnica de testemunhos de sondagem e mapeamento de superfície. Informações detalhadas sobre os procedimentos geotécnicos são apresentadas na seção 7.4.

O software NPV Scheduler requer entradas geotécnicas da "região de talude" individual, que define os parâmetros geotécnicos para cada litologia e domínio geotécnico. Foram atribuídos os valores dos ângulos de inclinação entre rampas (agrupamento por litologias) aplicados em cada bloco, agrupando as litologias de acordo com a Tabela 11-28.

Localmente, a cava operacional de reservas pode exceder a cava de recursos, o que é perfeitamente aceitável devido aos setores geotécnicos definitivos das minas, às características geomecânicas e estruturais dos materiais e ao projeto final de rampas e acessos para esta cava.

A demanda por água neste complexo de mineração é fornecida por fontes subterrâneas e de superfície. A água de superfície é coletada na barragem do Igarapé Gelado e usada como água bruta para o processo industrial da planta de processamento de minério de ferro. A água subterrânea é coletada através de furos profundos tubulares nas minas N4 e N5, sendo destinada ao uso industrial, abastecimento de WTP, despoejamento de estradas, reabastecimento de água nos córregos Jacaré e Buriti. O restante destina-se às barragens de Pêra e Gelado. A Tabela 11-25 mostra os parâmetros geotécnicos usados na geração da cava de recursos.

Tabela 11-25 - Parâmetros geotécnicos

Depósito	Litologias	Ângulo Geral VPL
N1	AT	22
	MD	31
	MSD	34
	CE-CQ	36
	FM-HF-HMN	41
	HC-JP-MS	46
N2	AT	22
	IN-MD	31
	CE-CQ	33
	QT	36
	FMN-HF-HMN-MSD	41
	Interface	46
	HC-JP	48
N3	AT	22
	XI-MD	31
	CE-CQ	36
	FMN-HF-HMN-MSD	41
	Interface	46
	HC-JP	48
N4	AT	22
	AG-MD	31
	CE-CQ	36
	FMN-HF-HMN-MSD	41
	HC-MS-JP	46
N5	AT	22
	MD	31
	CE-CGL-CQ	36
	MN-FF-HF-HMN-MSD	41
	HC-MS-JP	46

Parâmetros de disposição de estéril/rejeitos

O estéril gerado pela cava de recursos estão contidos no Plano Diretor de Estéril e Rejeitos do Corredor Norte, cujos projetos estão em um nível de desenvolvimento conceitual, exigindo estudos adicionais para definir sua viabilidade técnica, econômica e ambiental para sua implementação, conforme necessário no Plano Diretor de Ferrosos e LOM desse depósito.

Parâmetros de direitos minerários/superfície

O direito minerário da Vale (DM) cobre toda a área da caixa do modelo, portanto, não é uma restrição para o desenvolvimento de cava de recursos minerais. (Figura 11-28).

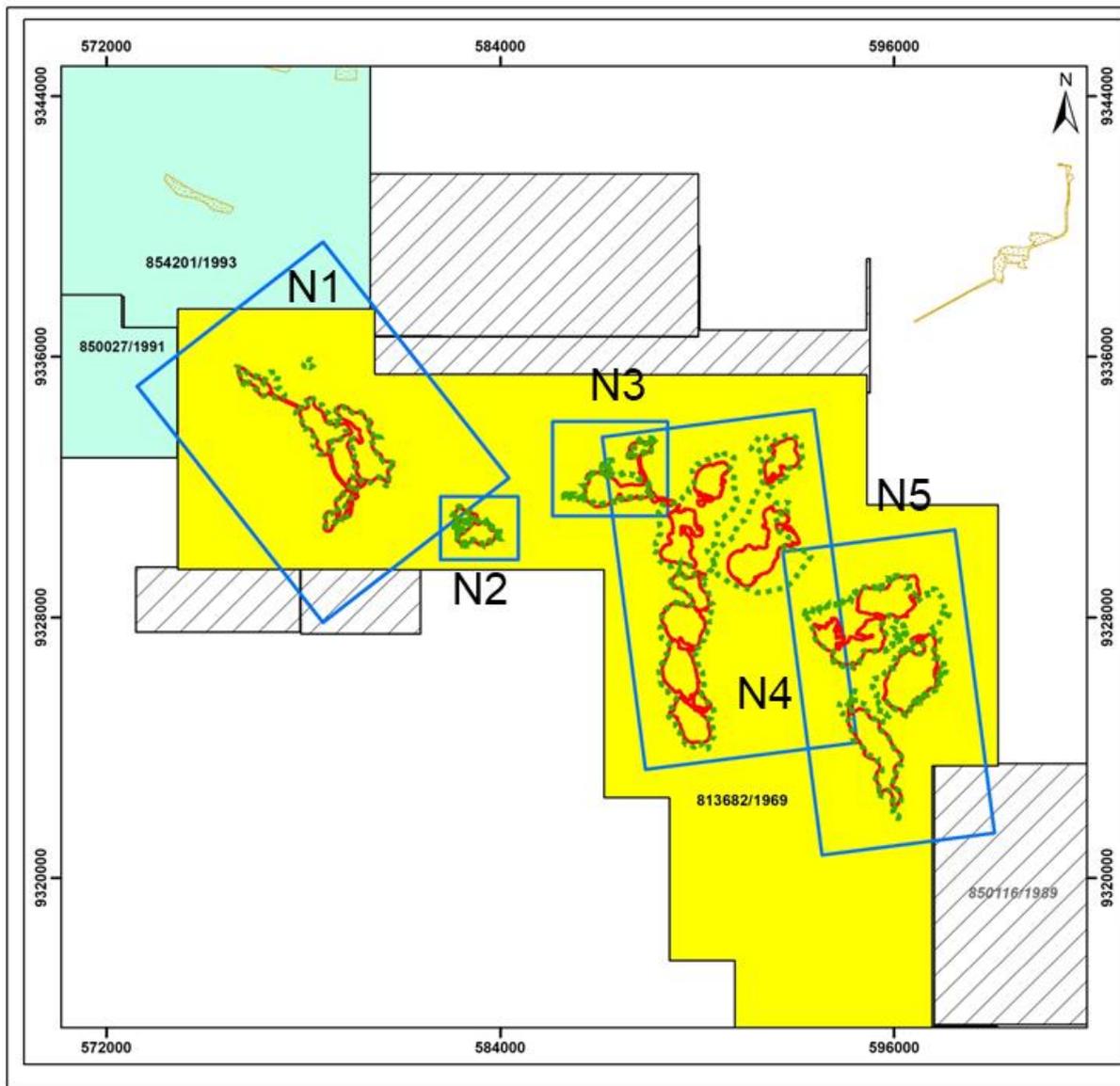


Figura 11-28 - Limites de DMs da Vale e limites da caixa de modelo geológico da Serra Norte (polígonos azuis), concessão de mineração da Vale em amarelo.

Parâmetros de meio ambiente / de sustentabilidade / espeleológicos

Os depósitos cobertos neste relatório estão localizados na Floresta Nacional de Carajás (FLONACA). Esta unidade de conservação foi aprovada pela Portaria n° 45 em 28/04/2004 e revisada em 9 de maio de 2016.

Atualmente, as minas N4 e N5 operam sob as licenças ambientais LO 267/2002, que permitem a exploração (exploração, mineração e processamento) de minério de ferro a partir de minas e expansões existentes, bem como LP 488/2014, o que permite a expansão das minas nos corpos denominados N4WS e N5S (2° estágio), Morro 1 e Morro 2, bem como o uso de algumas minas para descarte de resíduos. Os depósitos N1, N2 e N3 aguardam a aprovação das respectivas agências ambientais. Há uma expectativa razoável de obter todas as licenças ambientais (anteriores, instalação e operação) para esses projetos nos próximos 5 anos. As licenças para eventuais expansões de minas em operação e minas de recursos e reservas dos depósitos com um projeto concluído em nível FEL2 serão solicitadas dentro do prazo necessário para a mineração dessas respectivas áreas, de acordo com o Plano de Produção de Ferrosos (Plano Diretor).

A Zona de Mineração desta unidade de conservação inclui depósitos de minério de ferro licenciados (N4 e N5) e licenciamento em processo (N1, N2 e N3). A região noroeste de N1 e N5 (uma área denominada Morro 2) foi mantida fora da zona de mineração (considerada uma zona de manejo

sustentável). O objetivo dessa zona é concentrar as atividades de mineração, minimizando o impacto nas áreas adjacentes e outras zonas (Plano Nacional de Gestão Florestal de Carajás – ICMBio-2016). Zonas Primitivas nas quais nenhuma atividade de mineração e processamento é permitida foram consideradas restrições absolutas em N4 e N5.

Foram considerados restrições ambientais os buffers de 150 m de raio no entorno de cavidades de máxima relevância e o buffer ao redor de duas lagoas, bem como área de contribuição hídrica.

Parâmetros de restrição de estrutura física

A britagem primária móvel ou semimóvel, TCLDs, escritórios e pilhas internas de alimentação da planta não foram considerados como restrições para os depósitos da Serra Norte, pois essas estruturas podem ser realocadas e têm pouca ou nenhuma interferência com a cava de recursos. Somente o polígono de proteção de 100 m ao redor da Planta 2 em N4 foi considerado uma restrição definitiva.

11.16.3. Definições de recursos minerais

A cava de recursos não conseguiu alcançar todo o inventário classificado.

Devido às restrições impostas pelos limites ambientais descritos e razoabilidade econômica, nem todo o inventário mineral foi convertido em recursos minerais. A taxa de conversão de recursos/inventário para os modelos da Serra Norte foi superior a 78%.

Para todos os depósitos da Serra Norte, foi utilizada a cava matemática do NPV Scheduler com fator de preço de 110% para cada depósito e foi escolhido o maior VPL.

A Tabela 11-26 a Tabela 11-31 mostra os números de tonelagem/teor dos Recursos Minerais (exclusivos das Reservas) para os depósitos de N1, N2, N3, N4E, N4W e N5, respectivamente, separados por litotipo, considerando as cavas de Recursos otimizados.

Tabela 11-26 – Recursos Minerais exclusivos das Reservas de depósito N1 por litotipo

Recurso Mineral adicional às Reservas Minerais	Medido		Indicado		Inferido		TOTAL	
	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL
lito	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe
ce	6,4	64,6	13,3	64,2	4,0	62,8	23,7	64,1
hc	13,6	66,3	7,1	65,9	3,1	65,2	23,8	66,0
hf	107,3	66,6	112,2	66,5	45,6	66,7	265,0	66,6
hmn	0,9	61,6	0,8	61,6	-	-	1,8	61,5
Total	128,1	66,5	133,4	66,2	52,8	66,3	314,2	66,3

Tabela 11-27 – Recursos Minerais (Reservas Minerais excluídas) de depósitos N2 por litotipo

Recurso Mineral adicional às Reservas Minerais	Medido		Indicado		Inferido		TOTAL	
	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL
lito	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe
ce	0,0	61,7	1,0	61,2	1,2	61,7	2,2	61,5
hc	0,1	64,4	0,1	62,7			0,2	63,2
hf	1,7	66,2	16,7	65,6	12,0	65,5	30,4	65,6
hmn	0,0	62,5	0,4	61,6			0,5	61,7
Total	1,8	66,1	18,2	65,3	13,2	65,2	33,2	65,3

Tabela 11-28 – Recursos Minerais (Reservas Minerais excluídas) de depósitos N3 por litotipo

Recurso Mineral adicional às Reservas Minerais	Medido		Indicado		Inferido		TOTAL	
	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL
lito	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe
ce	0,1	61,9	0,8	61,8	0,2	61,5	1,1	61,8
hc	0,3	66,5	0,4	66,6	0,2	66,3	0,9	66,5
hf	7,0	66,2	19,6	66,0	23,3	66,2	50,0	66,1
hmn	0,1	61,5	0,3	58,4	0,2	57,8	0,7	58,5
Total	7,5	66,1	21,1	65,7	24,0	66,1	52,6	66,0

Tabela 11-29 – Recursos Minerais exclusivos das Reservas de depósito N4E por litotipo

Recurso Mineral adicional às Reservas Minerais	Medido		Indicado		Inferido		TOTAL	
	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL
lito	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe
ce	3,7	62,2	3,2	60,7	1,1	62,9	8,0	61,7
hc	10,6	66,6	11,8	66,6	8,4	66,7	30,9	66,6
hf	72,9	65,6	49,5	65,6	25,1	65,3	147,6	65,6
hmn	3,7	61,3	1,1	61,1	0,1	60,4	4,8	61,2
Total	91,0	65,4	65,6	65,5	34,7	65,5	191,3	65,5

Tabela 11-30 – Recursos Minerais exclusivos das Reservas de depósito N4W por litotipo

Recurso Mineral adicional às Reservas Minerais	Medido		Indicado		Inferido		TOTAL	
	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL
lito	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe
ce	5,7	62,4	6,2	62,6	1,7	63,4	13,6	62,6
hc	1,5	64,0	0,6	64,0	0,2	65,5	2,3	64,1
hf	89,1	66,3	65,0	66,2	36,4	66,0	190,5	66,2
hmn	2,7	62,6	0,9	61,6	0,2	60,6	3,7	62,3
Total	99,1	66,0	72,7	65,8	38,4	65,8	210,1	65,9

Tabela 11-31 – Recursos Minerais exclusivos das Reservas de depósito N5 por litotipo

Recurso Mineral adicional às Reservas Minerais	Medido		Indicado		Inferido		TOTAL	
	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL	Tonelagem	FeGL
lito	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe	Mt	%Fe
ce	21,6	64,0	17,5	64,0	7,1	62,3	46,2	63,7
hc	15,9	67,0	10,6	66,2	4,0	65,5	30,5	66,5
hf	223,8	67,3	148,9	66,8	118,8	66,5	491,6	67,0
hmn	4,0	61,4	3,5	60,9	0,4	58,0	7,9	61,0
Total	265,2	66,9	180,5	66,4	130,3	66,2	576,1	66,6

A estimativa de Recursos Minerais (adicional às Reservas Minerais) é efetiva em 31 de dezembro de 2021 de material in situ). A estimativa de Recursos Minerais (adicional às reservas minerais) está entre a bases topográficas mínimas entre dezembro/2010 e setembro/2021 para as minas em

operação de N4 e N5. Para N1, N2 e N3 (projetos em desenvolvimento), foi utilizado o levantamento aéreo a laser, delimitado por cavas de recursos com razoabilidade econômica. Os teores de ferro são expressos em base seca e a massa em base natural.

A geração de cavas de Recursos foi concluída utilizando premissas econômicas, legais, geotécnicas e ambientais e outros fatores modificadores.

Os totais na tabela são arredondados para refletir a incerteza da estimativa. O número total de toneladas e teores pode ser diferente devido a esse arredondamento.

Os Recursos Minerais estão de acordo com os Requisitos de Divulgação da Propriedade Modernizada da Comissão de Valores Mobiliários (SEC) dos Estados Unidos para Companhias Registradas de Mineração, conforme descrito na Subparte 229.1300 do Regulamento S-K, Divulgação por Companhias Registradas Envolvidas nas Operações de Mineração (S-K 1300) e Resumo do Relatório Técnico do Item 601 (b)(96).

11.16.4. Conclusões e recomendações do responsável técnico

Em relação à geometria da cava de recursos, a forma da cava é totalmente aderente à classificação dos recursos e é limitada apenas por restrições ambientais e sociais (zona primitiva do Plano Nacional de Gestão Florestal de Carajás). Apesar dessas restrições, existe potencial para conversão de Recursos Inferidos, Medidos ou Indicados e aumento de Recursos Minerais, especialmente na porção norte da cava N5W e no depósito denominado Morro 2. O desenvolvimento de estudos de processamento mineral para materiais marginais (jaspilitos, canga química, manganês e formações máficas decompostas) deve continuar com o objetivo de avaliar o impacto desses materiais nas atuais plantas de processamento e futuras adaptações.

Sondagens de condenação devem ser realizados nas proximidades dos corpos mineralizados para caracterizar áreas potenciais para pilhas de estéril, britagem e TCLDs para possível expansão das operações atuais.

11.16.5. Incertezas que podem afetar a estimativa de recursos minerais

As áreas de incerteza que podem afetar materialmente todas as estimativas de recursos minerais incluem:

- Mudanças nas premissas de taxa de câmbio e preço do metal a longo prazo;
- Mudanças nas interpretações locais da geometria de mineralização com campanhas de sondagem adicionais; falhas, diques e outras estruturas; e continuidade dos corpos de minério;
- Mudanças na forma geológica e teor, e premissas geológicas e de continuidade de teor;
- Mudanças nas interpretações variográficas e intervalos de elipse de busca que foram interpretados com base em dados de sondagem limitados, quando a sondagem com espaçamento mais curto se torna disponível;
- Mudanças nas premissas de recuperação metalúrgica;
- Mudanças nas premissas de diluição e recuperação de lavra previstos;
- Variações nas premissas de métodos geotécnicos, hidrogeológicos e de lavra;
- Mudanças nas premissas de licença ambiental, permissão e social.

12. Estimativas de reserva mineral

12.1. Resumo

A Tabela 12-1 resume a estimativa de Reserva Mineral em vigor a partir de 31 de dezembro de 2021.

Tabela 12-1 - Estimativa de reserva mineral

Cava/Operação	Classificação	Tonelagem (Mt)	Fe (%)
N1	Provada		
	Provável	323,6	66,1
	Subtotal Provada + Provável	323,6	66,1
N2	Provada		
	Provável	42,9	66,3
	Subtotal Provada + Provável	42,9	66,3
N3	Provada		
	Provável	91,8	65,3
	Subtotal Provada + Provável	91,8	65,3
N4	Provada	337,7	66,5
	Provável	295,1	66,3
	Subtotal Provada + Provável	632,8	66,3
N5	Provada	126,6	65,0
	Provável	372,5	64,9
	Subtotal Provada + Provável	499,1	64,9
Total	Provada	464,3	66,1
	Provável	1.125,9	65,7
	Total Provada + Provável	1.590,2	65,8

Notas para acompanhar as tabelas de reservas minerais:

1. A data efetiva da estimativa é 31/12/2021.
2. Tonelagem declarada em milhões de toneladas métricas incluindo 6,41% de teor de umidade e teor de %Fe seco. O ponto de referência utilizado são as toneladas métricas *in situ*.
3. A viabilidade econômica da reserva mineral foi determinada com base na curva de preços, sendo o preço de longo prazo de US\$ 70/dmt para 62% de ferro.
4. A estimativa assumindo métodos de lavra a céu aberto usa o seguinte parâmetro de entrada chave: custo de lavra 1,9 US\$/t lavrada; custo do processo a partir de 1,6 US\$/t processado; outros custos incluem custo de venda a partir de 31,2 US\$/t produto, recuperações de massa variável; Recuperação de lavra de 98,9% e diluição de 1,35%.
5. Os números foram arredondados.

As Reservas Minerais foram estimadas pela Vale e revisadas pelo PQ da Vale. Os Recursos Minerais Medidos e Indicados foram utilizados como insumos para conversão em Reservas Minerais Comprovadas e Prováveis, respectivamente.

Os fatores modificadores de reserva foram adicionados primeiro ao software de otimização. O software NPVScheduler® foi utilizado para gerar a cava, mas não há nenhum teor de corte econômico aplicado à reserva mineral e isso é principalmente devido ao teor de recurso, que possui em média 60% Fe e o fator de recuperação é de 99,5%, assim todo o material é tratado como minério. A superfície de outubro de 2020 foi usada para delimitar o modelo de blocos de recursos. Restrições ambientais, a presença de cavidades de minério de ferro e os limites das concessões de lavra também são carregados no NPVScheduler® antes da otimização da cava.

O valor econômico de cada bloco é calculado pelo software usando custos de mina e G&A, fator de recuperação, custo de venda e preço de venda da commodity. As cavas são geradas e a cava final é escolhida com base em critérios técnicos e econômicos, que podem variar entre as minas, desde a característica de uma mina específica, a maximização de VPL se a cava tiver uma maior razão estéril/minério ou, em alguns casos, a cava do fator de receita igual a 1 para uma menor relação estéril/minério.

Uma cava final é projetada e depois enviada ao NPVScheduler® e a otimização da cava é executada novamente. As fases econômicas são geradas e, posteriormente, um sequenciamento de produção. Reservas Minerais são reportadas como diluídas. O PQ da Vale certifica que estas foram totalmente sequenciadas em um plano LOM apropriado e aplicados a um modelo de fluxo de caixa descontado. A estimativa da Reserva Mineral demonstrou extração econômica viável.

O PQ da Vale não está ciente de quaisquer fatores de risco associados ou mudanças em qualquer aspecto dos fatores modificadores, como lavra, metalurgia, infraestrutura, permissão ou outros fatores relevantes que possam afetar materialmente a estimativa de Reserva Mineral.

12.2. Metodologia

12.2.1. Diluição

A diluição é estimada pela reconciliação entre o que foi alimentado na planta e o que foi planejado, ao longo de um ano. O teor é avaliado a cada duas horas a partir da amostragem da alimentação do britador e consolidado para todo o ano atual até o momento e comparado com o teor estimado do plano de lavra de curto prazo. A partir desta comparação, o fator de diluição para otimização da cava é definido.

12.2.2. Recuperação de Lavra

O cálculo da recuperação da lavra é obtido através da reconciliação entre a massa alimentada na planta e a massa planejada para cada ano. A massa britada é fornecida por data a partir das balanças na planta e consolidada por mês. A produção do ano é comparada com o plano de curto prazo e o fator de recuperação da lavra é determinado comparando o plano de produção com o real alcançado.

12.2.3. Valor líquido de retorno e valor de corte

Um valor de corte de NR é determinado usando os preços de metal da Reserva Mineral, recuperações de metal, custos de transporte, tratamento e operacionais da mina. Os preços de metal utilizados para as Reservas Minerais são baseados em um modelo de mercado estimado, no qual são considerados clientes específicos, oferta e demanda de minério de ferro exportado, bônus e penalidades de acordo com a qualidade do produto.

O valor de corte usado para as reservas é baseado em um lucro positivo do bloco.

Os custos e outros parâmetros usados para calcular o teor de corte são mostrados na Tabela 12-2. O teor de corte é de 11% considerando os parâmetros das plantas da Serra Norte. Não há teor de corte econômico aplicado à reserva mineral e isso é principalmente devido ao teor do recurso, que

possui uma média de 60% Fe e está acima da estimativa do teor de corte. O corte não é relevante para a estimativa das Reservas. No entanto, uma verificação é realizada.

Tabela 12-2: Parâmetros de teor de corte para a planta da Serra Norte

Item	Unidades	Parâmetros
Recuperação Metalúrgica	%	98,9
Produto Fe a ser pago	%	65,5
Preço	USD/t de produto	64,5
Custo de Mina	USD/t de rocha.	1,9
Custo de Processamento	USD/t alimentado	1,6
Custo de Venda	USD/t de produto	31,2

12.2.4. Custos

O custo foi baseado nas operações e projeção base dos indicadores operacionais, que inclui infraestrutura de apoio, estudos ambientais e viabilidade operacional continuada. A Tabela 12-3 apresenta os custos utilizados na otimização da cava.

Tabela 12-3 - Fatores modificadores para otimização da cava

Item	Unidade	Custo
Lavra	US\$/t material	1.46 to 3.67
Planta de processamento	US\$/t alim.britador	1.6
Outros Custos	US\$/t produto	31.2
Custo de aprofundamento	US\$/m	0.0045
Recuperação de mina	%	96.4
Diluição de mina	%	1.35

12.2.5. Preço

As curvas de preços são fornecidas pelo departamento de Mercado da Vale e elaboradas a partir de um modelo de preço estimado de mercado, no qual são consideradas características do cliente, oferta e demanda de minério de ferro transoceânico, bônus e os deletérios de acordo com a qualidade do produto. Como preço de referência foi utilizado US\$ 60/dmt (62% Fe) que varia de acordo com os teores de minério de ferro.

12.2.6. Cavidades

Os limites da cavidade de minério de ferro são atualizados em um banco de dados especial. A classificação dessas cavidades é regulada pela lei federal brasileira. Uma distância de afastamento de 150m como zona de exclusão para cavidades de máxima relevância.

12.2.7. Recuperação em Massa

Um fator de recuperação constante de 99,5% foi usado, pois o processo não possui concentração. São usados dados históricos com base no balanço de massa de entrada e saída.

12.2.8. Ângulos de Inclinação dos Taludes

As cavas são geradas com os ângulos de inclinação gerais fornecidos para cada litologia. A política da empresa considerou dois fatores de segurança:

- 1,3 em outras áreas da cava;
- 1,5, em regiões onde existem estruturas, tais como pilhas, instalações industriais, ferrovias, rodovias, etc.

Após a otimização da cava, os resultados são enviados para a equipe geotécnica que procede à setorização geotécnica, que será então utilizada na operação das cavas.

12.3. Fatores que podem afetar a estimativa de reserva mineral

Os seguintes fatores podem afetar os resultados das Reservas Minerais obtidas:

- Preços das commodities de ferro.
- Taxa de câmbio do dólar americano.
- Taxa de inflação brasileira.
- Premissas geotécnicas (incluindo sismicidade) e hidrogeológicas.
- Mudanças na entrada de capital e na estimativa de custos operacionais.
- Mudança nas premissas de custo operacional.
- Premissas de estoque.
- Capacidade da operação de mina para atender à taxa de produção anual.
- Recuperações da planta de processo e capacidade de controlar níveis de elementos deletérios dentro das expectativas do plano LOM.
- Capacidade de atender e manter licenças e permissões ambientais e capacidade de manter uma licença social para operar.

De acordo com o conhecimento do PQ, não existem outros aspectos ambientais, de licenciamento, legais, de título, fiscais, questões sócio-políticas ou de marketing que possam afetar materialmente a estimativa de reserva mineral, que não tenham sido discutidas neste Relatório.

13. Métodos de lavra

13.1. Resumo

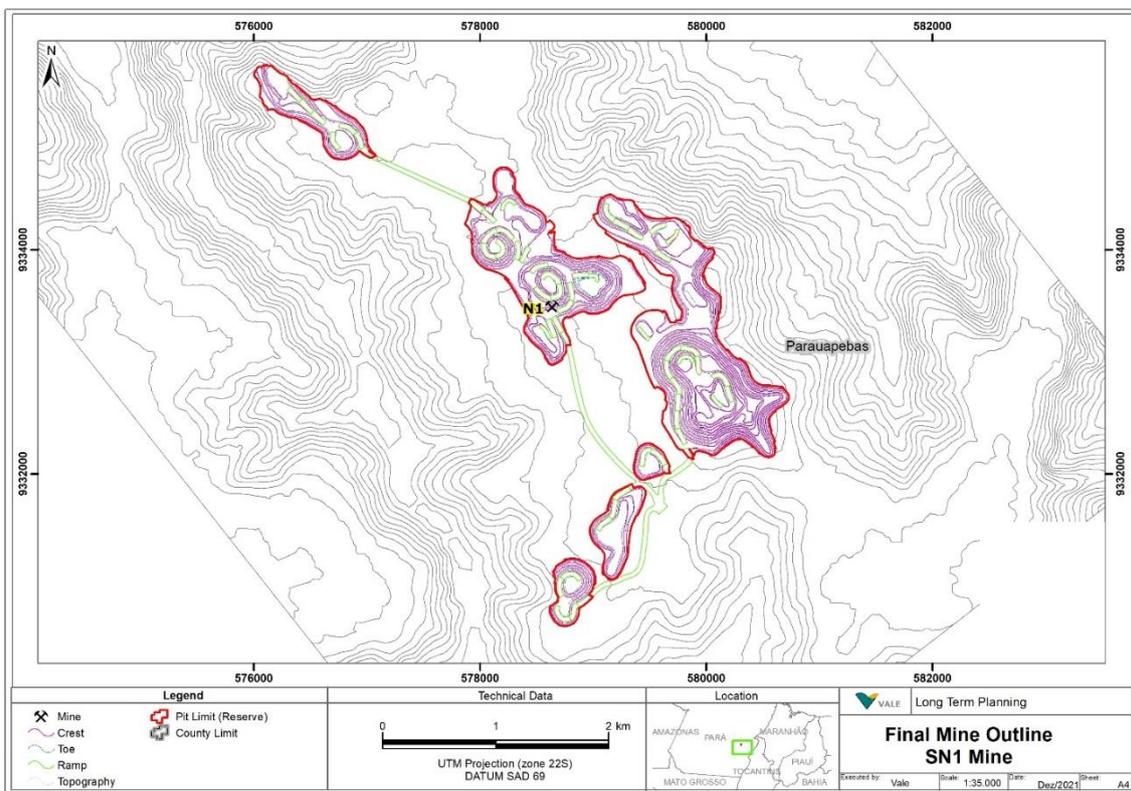
Serra Norte opera desde 1985, com taxas de produção de aproximadamente 100 Mtpa nos últimos anos. A mina é uma cava a céu aberto por bermas e bancadas e utiliza grandes caminhões e escavadeiras. A lavra é realizada em cinco minas separadas.

As minas N4 e N5, atualmente em operação, utilizam lavra a céu aberto e são operadas por grandes equipamentos de carga e transporte, ou seja, escavadeiras hidráulicas com capacidade de carga de até 80 toneladas, escavadeiras a cabo com capacidade de carga de até 109 toneladas e carregadeiras com capacidade de carga de 72,6 toneladas. O transporte é realizado por caminhões com capacidade de carga útil de 400, 363 e 290 toneladas.

Em algumas regiões dessas minas, onde são apresentadas as cavidades máximas de minério de ferro relevantes, mineradores contínuos são utilizados, o que elimina a perfuração e detonação, reduzindo assim as vibrações do solo causadas por detonação e evitando danos às cavidades próximas às áreas de mineração.

13.2. Projeto de mina

O projeto de mina inclui bancadas com 15m de altura, bermas com 12m de largura, ângulos da face entre 26 e 85 graus, tudo de acordo com a litologia da mina. O acesso à rampa tem 40m de largura com gradiente de 10%. O minério é transportado para os estoques ou despejado diretamente nas caçambas britadoras. Os projetos de lavra são apresentados na Figura 13-1 a Figura 13-6.



Legenda:
Legenda
Mina
Crista
Pé
Rampa

Legend
Mine
Crest
Toe
Ramp

Topografia
 Limite da Cava (Reserva)
 Limite do Município

Dados Técnicos
 Projeção UT (zona 22S)
 DATUM SAD 69

Localização

Planejamento de Longo Prazo
 Esboço Final da Mina Mina SN1
 Executado por:
 Escala:
 Data: Dez/2021
 Folha:

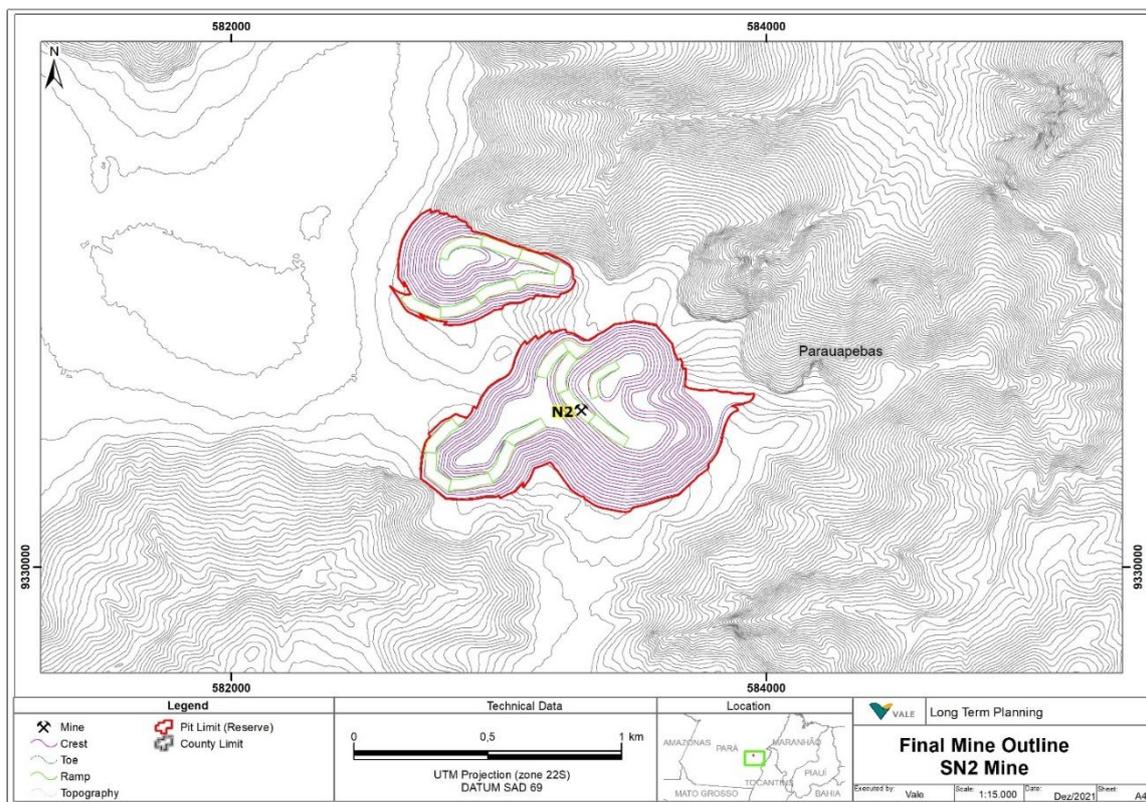
Topography
 Pit Limit (Reserve)
 County Limit

Technical Data
 UT Projection (zone 22S)
 DATUM SAD 69

Location

Long Term Planning
 Final Mine Outline SN1 Mine
 Executed by:
 Scale:
 Date: Dez/2021
 Sheet:

Figura 13-1 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N1.



Legenda

Mina
 Crista
 Pé
 Rampa
 Topografia
 Limite da Cava (Reserva)
 Limite do Município

Dados Técnicos
 Projeção UTM (zona 22S)
 DATUM SAD 69

Localização

Planejamento de Longo Prazo
 Esboço Final da Mina Mina SN2
 Executado por:
 Escala:

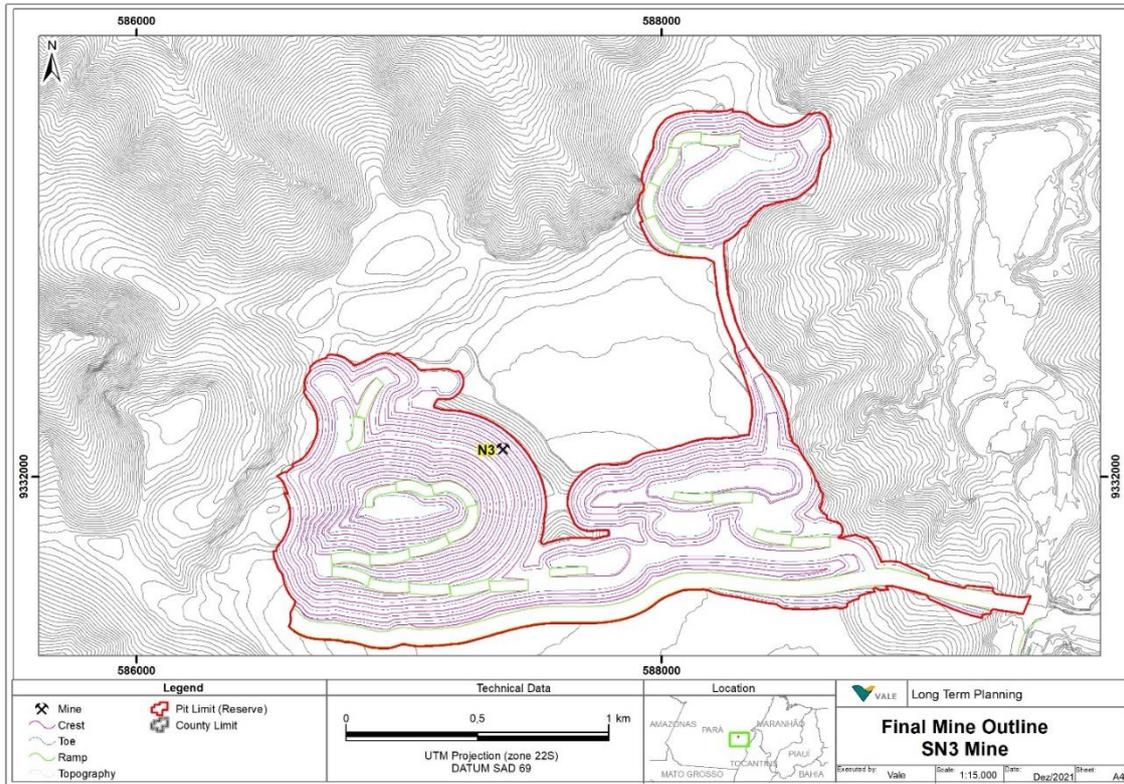
Mine
 Crest
 Toe
 Ramp
 Topography
 Pit Limit (Reserve)
 County Limit

Technical Data
 UTM Projection (zone 22S)
 DATUM SAD 69

Location

Long Term Planning
 Final Mine Outline SN2 Mine
 Executed by:
 Scale:

Figura 13-2 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N2.



Legenda:

Legenda
 Mina
 Crista
 Pé
 Rampa
 Topografia
 Limite da Cava (Reserva)
 Limite de Município

Dados Técnicos
 Projeção UT (zona 22S)
 DATUM SAD 69

Localização

Planejamento de Longo Prazo
 Esboço Final da Mina Mina SN3
 Executado por
 Escala:
 Data: Dez/2021
 Folha:

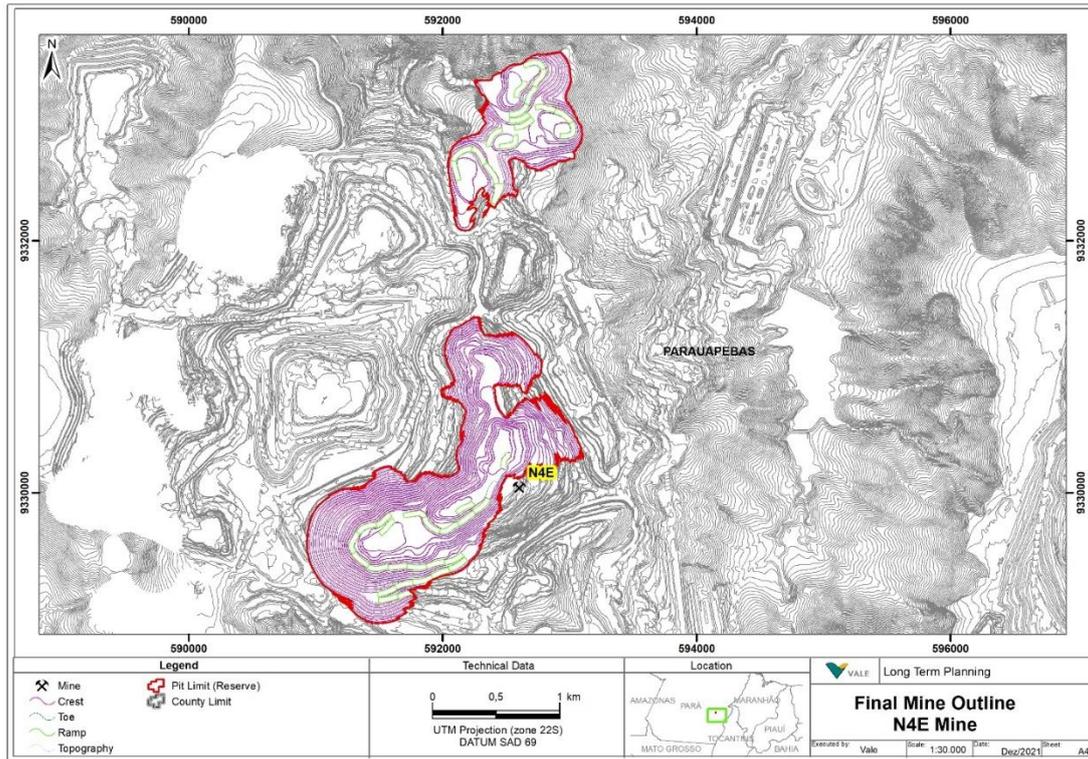
Legend
 Mine
 Crest
 Toe
 Ramp
 Topography
 Pit Limit (Reserve)
 County Limit

Technical Data
 UT Projection (zone 22S)
 DATUM SAD 69

Location

Long Term Planning
 Final Mine Outline SN3 Mine
 Executed by
 Scale:
 Date: Dez/2021
 Sheet:

Figura 13-3 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N3.



Legenda:

Legenda

- Mina
- Crista
- Pé
- Rampa
- Topografia
- Limite da Cava (Reserva)
- Limite do Município

Dados Técnicos
 Projeção UTM (zona 22S)
 DATUM SAD 69

Localização

Planejamento de Longo Prazo
 Esboço Final da Mina Mina N4E
 Executado por:
 Escala:
 Data: Dez/2021
 Folha

Legend

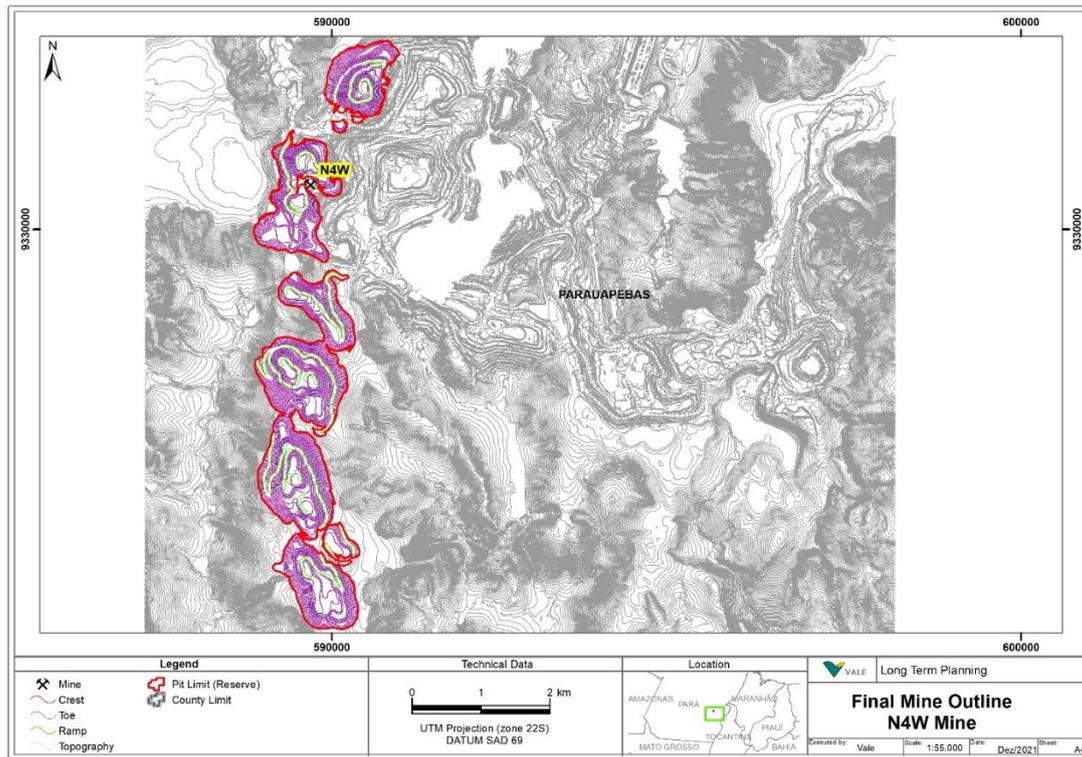
- Mine
- Crest
- Toe
- Ramp
- Topography
- Pit Limit (Reserve)
- County Limit

Technical Data
 UTM Projection (zone 22S)
 DATUM SAD 69

Location

Long Term Planning
 Final Mine Outline N4E Mine
 Executed by:
 Scale:
 Date: Dez/2021
 Sheet

Figura 13-4 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N4E.



Legenda:

Legenda

Mina
 Crista
 Pé
 Rampa
 Topografia
 Limite da Cava (Reserva)
 Limite do Município

Dados Técnicos
 Projeção UTM (zona 22S)
 DATUM SAD 69

Localização

Planejamento de Longo Prazo
 Esboço Final da Mina Mina N4W
 Executado por:
 Escala:
 Data: Dez/2021
 Folha:

Legend

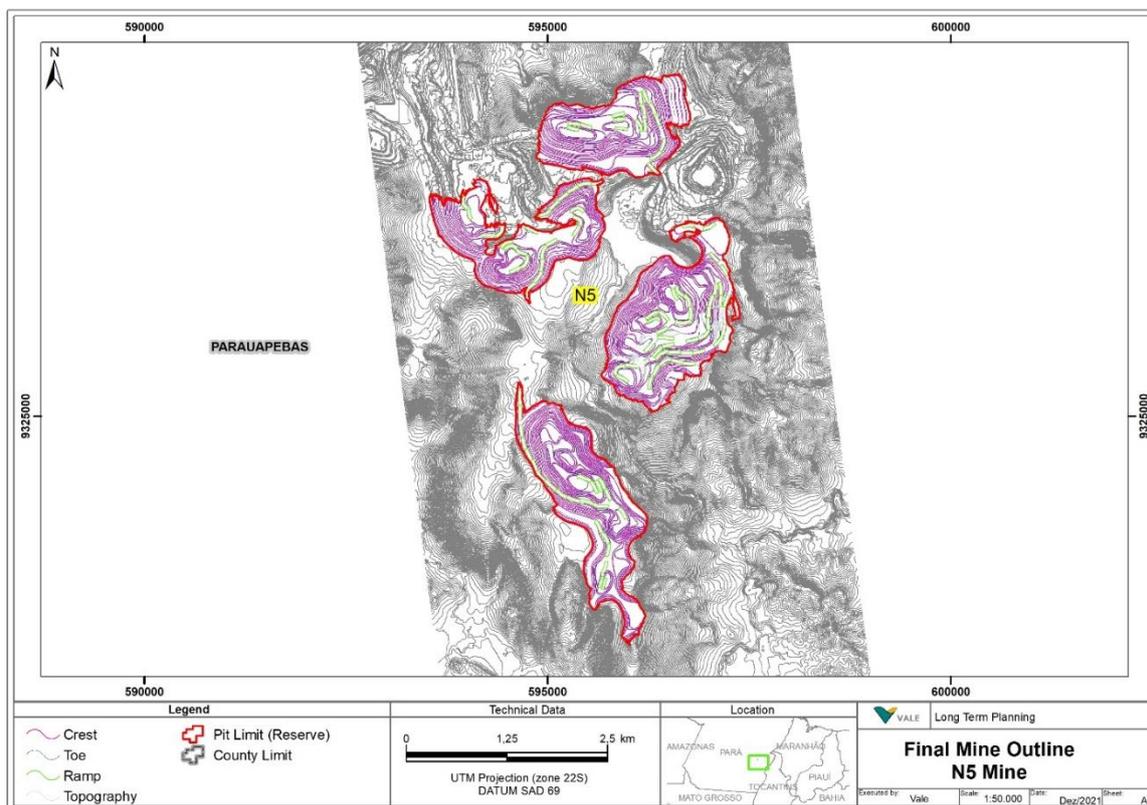
Mine
 Crest
 Toe
 Ramp
 Topography
 Pit Limit (Reserve)
 County Limit

Technical Data
 UTM Projection (zone 22S)
 DATUM SAD 69

Location

Long Term Planning
 Final Mine Outline N4W Mine
 Executed by:
 Scale:
 Date: Dez/2021
 Sheet:

Figura 13-5 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N4W.



Legenda:

Legenda

Crista
Pé
Rampa
Topografia
Limite da Cava (Reserva)
Limite do Município

Dados Técnicos
Projeção UTM (zona 22S)
DATUM SAD 69

Localização

Planejamento de Longo Prazo
Esboço Final da Mina N5
Executado por:
Escala:
Data: Dez/202
Folha:

Legend

Crest
Toe
Ramp
Topography
Pit Limit (Reserve)
County Limit

Technical Data
UTM Projection (zone 22S)
DATUM SAD 69

Location

Long Term Planning
Final Mine Outline N5 Mine
Executed by:
Scale:
Date: Dez/202
Sheet:

Figura 13-6 - Vista da planta do projeto de cava a céu aberto N5.

13.3. Método de lavra

O método de lavra na Serra Norte é a céu aberto, como uma operação padrão normal usada na indústria de mineração. Parte do material é escavação livre e outras partes requerem detonação. O minério é carregado nos caminhões de transporte rodoviário e despejado diretamente no britador. A mistura é necessária para ajustar o teor médio de Fe.

13.4. Considerações geotécnicas

As avaliações geotécnicas do projeto de talude final são desenvolvidas pela equipe interna e seguem a metodologia apresentada abaixo. Para apoiar as avaliações geotécnicas para o

Complexo Serra Norte, as avaliações anteriores foram utilizadas: Vale em 2016 e 2020, Geoestrutural em 2014 e 2016, TEC3 em 2016, WALM em 2019 e 2020.

A WALM concluiu um exercício de modelagem geomecânica 3D e uma avaliação das condições gerais de estabilidade dentro da mina. Essas avaliações fornecem padrões de projeto recomendados para os projetos de cava final e de final de período.

13.4.1. Visão geral geotécnica

As principais unidades litológicas foram descritas e modeladas com detalhes aceitáveis para apoiar a caracterização geotécnica e avaliação de riscos relacionadas às atividades de mineração. Conforme relacionado ao método de lavra (a céu aberto) empregado no momento da avaliação, as condições do maciço rochoso são bem compreendidas e apropriadas para as profundidades de lavra atuais, os tipos de reforço de rocha e a entrada geotécnica na produção da mina.

Os protocolos de mapeamento geotécnico e de análise de dados incluem práticas padrão da indústria, como descrições detalhadas dos vários domínios estruturais e suas características. Este trabalho é baseado em mapeamento de campo, modelagem geológica e perfuração geotécnica limitada.

A avaliação geotécnica dos parâmetros geométricos de cava final para N1, N2 e N3 foi originada a partir do modelo geomecânico 3D elaborado pela WALM em 2020, e N4 e N5 também elaborados pela WALM, mas em 2020, com o objetivo principal de avaliar a estabilidade global da mina para condições reais e de longo prazo. Este modelo permite a avaliação da resposta do maciço rochoso em termos de taludes e estabilidade de trabalho da mina.

O modelo geomecânico 3D usado foi compilado incluindo perfuração de sondagem geotécnica e o mapeamento realizado por BVP em 2011, WALM em 2019 e 2020.

13.4.2. Modelos geotécnicos e de maciços rochosos

Os modelos geomecânicos do complexo da mina da Serra Norte (N1, N2, N3, N4 e N5) foram construídos de acordo com as classificações RMR e Rocha Frágil, subdividindo o maciço rochoso nas seguintes classes: I, II, III, IV, Frágil, Muito Frágil e Extremamente Frágil. O mapeamento estrutural, apresentando os principais domínios das estruturas e suas respectivas estereonetes e os relatórios com informações gerais utilizadas para construir modelos geomecânicos e estruturais para os locais da mina de Serra Norte estão resumidos na Tabela 13-1.

Tabela 13-1 - Relatórios resumidos utilizados para construção do modelo estrutural e modelo geomecânico 3D – Complexo de Minas de Serra Norte

Mina	Consultores responsáveis pelo Mapeamento Estrutural e Modelo Geomecânico	Ano do Mapeamento Estrutural / Ano do Modelo Geomecânico	Furos com ensaio geotécnico		Pontos Mapeados da Superfície	Seções Verticais Geomecânicas
			Quantidade de furos	Total perfurado (m)		
N1	Geoestrutural / Walm	2014 / 2020	62	12.848	217	52
N2	Geoestrutural / Walm	2014 / 2020	41	7.286	99	17
N3	Geoestrutural / Walm	2014 / 2020	80	17.205	137	19
N4	BVP e Walm / Walm	2011 e 2019 / 2019	1950	281.000	8.450	52
N5	BVP e Walm / Walm	2011 e 2019 / 2019	1076	158.000	3.460	39

Os parâmetros geotécnicos foram definidos de acordo com o litotipo obtido a partir do modelo geológico, a classificação do maciço rochoso a partir do modelo geomecânico e características estruturais (anisotropias e descontinuidades) foram obtidas a partir de mapeamento estrutural e seções geológicas. O relatório de testes laboratoriais de resistência utilizado para definir os parâmetros geotécnicos utilizados na análise de estabilidade do talude no Complexo de minas de Serra Norte está resumido na Tabela 13-2. Para os litotipos que não possuem testes na mina avaliada, foram utilizados os parâmetros de minas próximas com contextos litoestratigráficos, tectônicos e geomecânicos semelhantes.

Tabela 13-2 - Relatórios de testes laboratoriais geotécnicos - Complexo de Minas de Serra Norte

Teste de Laboratório	Empresa	Ano	Número de Testes
Ensaio de Cisalhamento Triaxial Consolidado Drenado (CD)	CESP	2006	4
Ensaio de Cisalhamento Triaxial Consolidado Não Drenado (CU)	CESP	1991	2
	CESP	1996	12
	CESP	2006	20
	CESP	2012	1
	INFRAGEO	2017	4
	GEOMINAS	2018	13
Cisalhamento Direto	CESP	2006	8
Resistência de Compressão Não Confinada (UCS)	CESP	1991	3
	CESP	2012	5

13.4.3. Modelo hidrológico

O Plano Diretor de Drenagem Superficial com o layout e dimensionamento dos dispositivos foi desenvolvido em 2020 por TEC3 (RL-1020KN-X-00005-00, RL-1020KN-X-00006-00, RL-1020KN-X-00008-00 e RL-1020KN-X-00004-00), para cavas N1, N2, N3, N4 e N5.

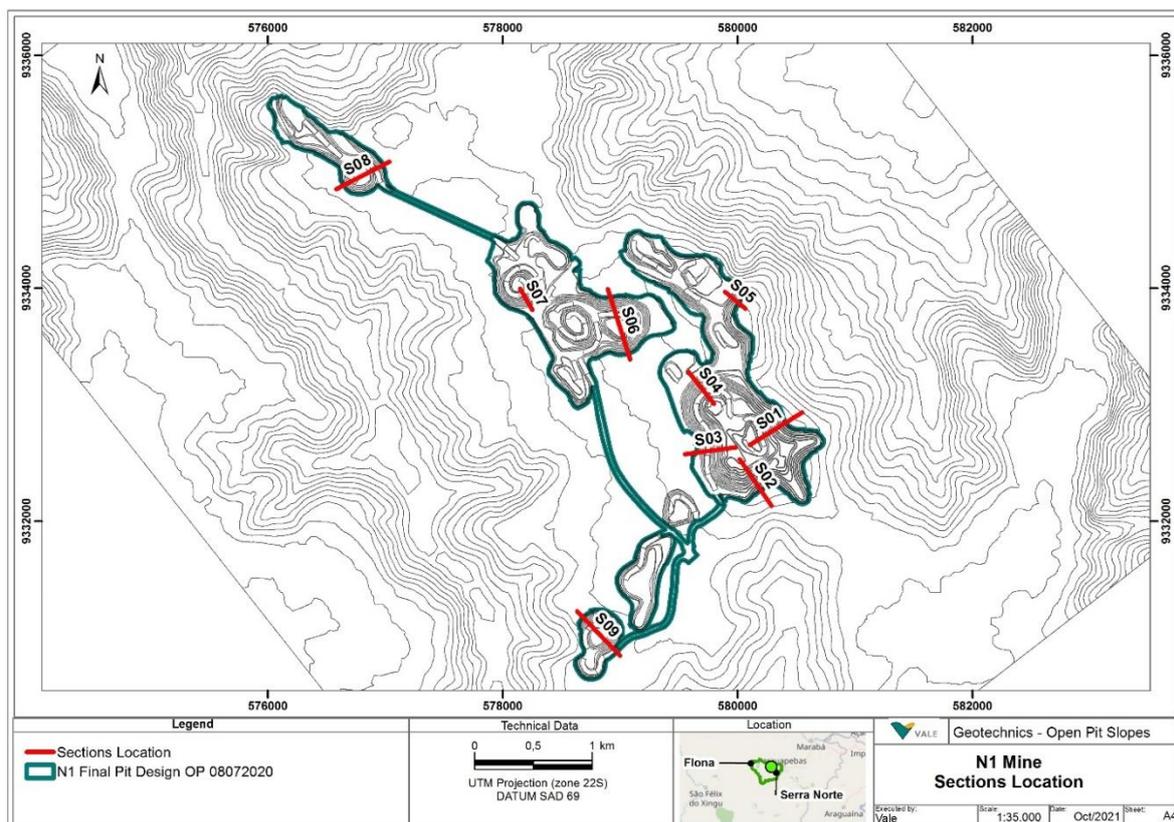
13.4.4. Análise de estabilidade do talude

Análises determinísticas de equilíbrio limite foram feitas para avaliar possíveis falhas de translação (circular e não circular), com base no modelo geotécnico. O nível de água utilizado foi apresentado no Capítulo 13.5.

Essas análises foram feitas ao longo de toda a cava, com base nas seções representativas das condições que podem influenciar as instabilidades (seções críticas) na escala inter-rampa ou geral e nas seções transversais avaliadas são apresentadas na Figura 13-7 a Figura 13-12.

Os principais mecanismos de falha identificados ao longo das Minas do Complexo Serra Norte são circulares e não circulares principalmente em Hematitas Friáveis e Máficas Decompostas, predominantemente classificadas como Frágil no modelo geomecânico. Outras superfícies de falha foram influenciadas pela zona de cisalhamento nos contatos da Formação Ferrífera/Máfica Decomposta.

O resumo dos resultados das análises de estabilidade de taludes representado pelo FoS, as interferências próximas à mina consideradas em cada seção e outras informações são apresentadas na Tabela 13-3 a Tabela 13-7.



Legenda:
Localização das Seções
Projeto de Cava Final N1 OP 08072020

Sections Location
N1 Final Pit Design OP 08072020

Dados Técnicos
Projeção UTM (zona 22S)
DATUM SAD 69

Technical Data
UTM Projection (zone 22S)
DATUM SAD 69

Localização

Location

Taludes Geotécnicos de Cava a Céu Aberto
Localização das Seções da Mina N1
Executado por:
Escala:
Data: Out/2021
Folha:

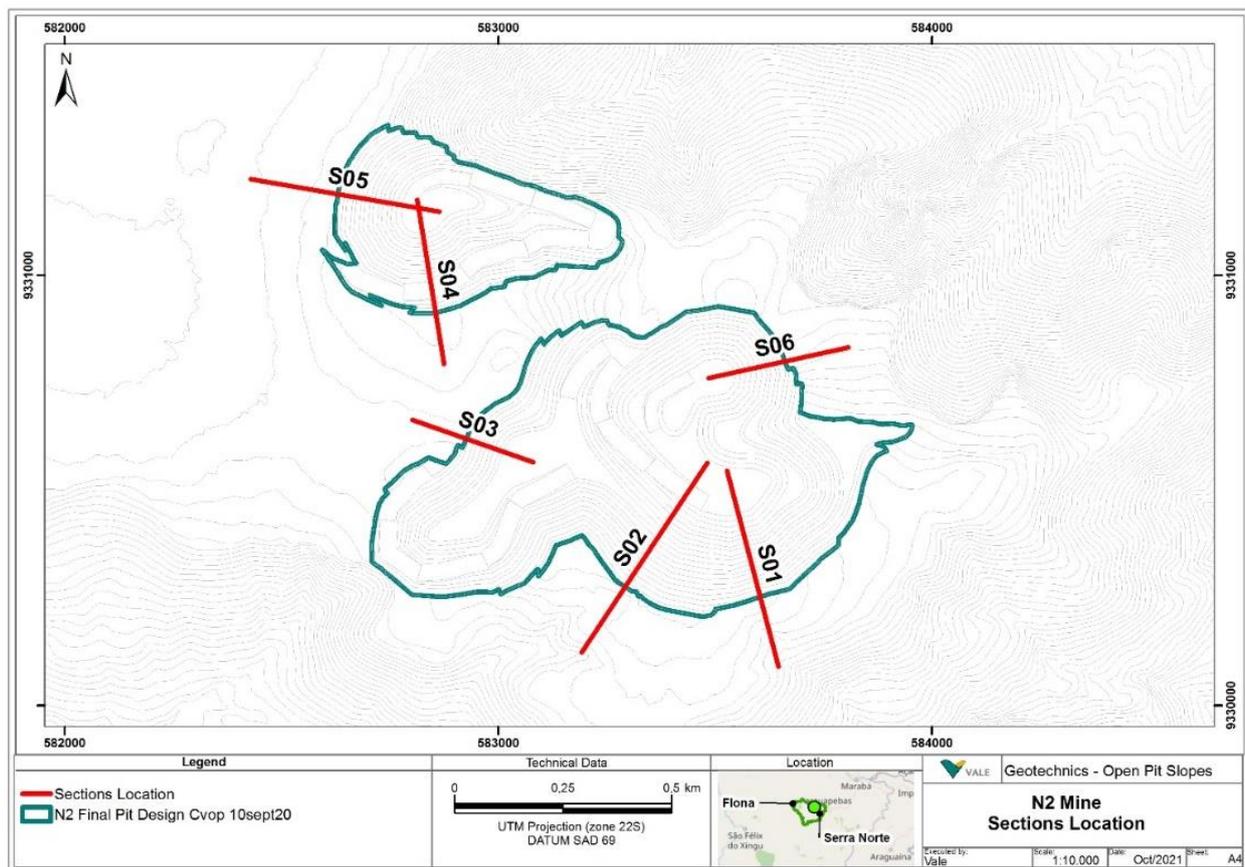
Geotechnics Open Pit Slopes
N1 Mine Sections Location
Executed by:
Scale:
Date: Oct/2021
Sheet:

Figura 13-7 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N1.

Tabela 13-3 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N1

Cava	Seção	Critérios aceitáveis		Resultados			
		FoS (obrigatório)	Interferência próxima à mina	FoS	Tipo de Superfície	Escala de Falha	Desencadeador de Falha
N1	S01	1,30	-	1,64	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S02	1,30	-	1,48	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S03	1,30	-	1,82	Não circular	Geral	Resistência da rocha intacta

S04	1,30	-	1,56	Não circular	Geral	Resistência da rocha intacta
S05	1,30	-	1,56	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
S06L	1,30	-	1,50	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
S06R	1,30	-	1,59	Não circular	Geral	Resistência da rocha intacta
S07	1,30	-	1,65	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
S08L	1,30	-	1,90	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
S08R	1,30	-	1,79	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
S09L	1,30	-	1,63	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
S09R	1,30	-	1,53	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta



Legenda:

Legenda
Localização das Seções
Projeto de Cava Final N2 Cvop 10set20

Dados Técnicos
Projeção UT (zona 22S)
DATUM SAD 69

Legend
Sections Location
N2 Final Pit Design Cvop 10sept20

Technical Data
UT Projection (zone 22S)
DATUM SAD 69

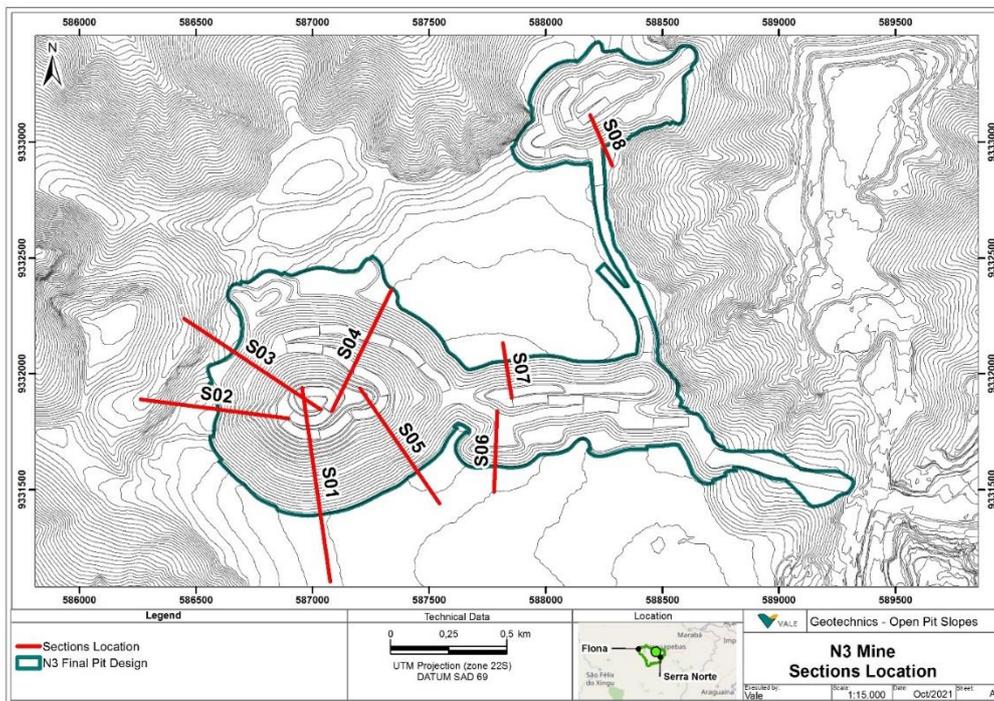
Localização
 Taludes Geotécnicos de Cava a Céu Aberto
 Mina N2
 Localização das Seções
 Executado por:
 Escala:
 Data: Out/2021
 Folha:

Location
 Geotechnics Open Pit Slopes
 N2 Mine
 Sections Location
 Executed by:
 Scale:
 Date: Oct/2021
 Sheet:

Figura 13-8 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N2.

Tabela 13-4 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N2

Cava	Seção	Critérios aceitáveis		Resultados			
		FoS (obrigatório)	Interferência próxima à mina	FoS	Tipo de Superfície	Escala de Falha	Desencadeador de Falha
N2	S01	1,30	-	2,46	Circular	Local	Resistência da rocha intacta
	S02	1,30	-	1,42	Não circular	Global	Resistência da rocha intacta
	S03	1,30	-	1,68	Circular	Local	Resistência da rocha intacta
	S04	1,30	-	1,61	Circular	Local	Resistência da rocha intacta
	S05	1,30	-	1,33	Circular	Global	Resistência da rocha intacta
	S06	1,30	-	1,53	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta



Legenda:

Legenda
 Localização das Seções
 Projeto de Cava Final N3

Legend
 Sections Location
 N3 Final Pit Design

Dados Técnicos
 Projeção UTM (zona 22S)
 DATUM SAD 69

Technical Data
 UTM Projection (zone 22S)
 DATUM SAD 69

Localização

Location

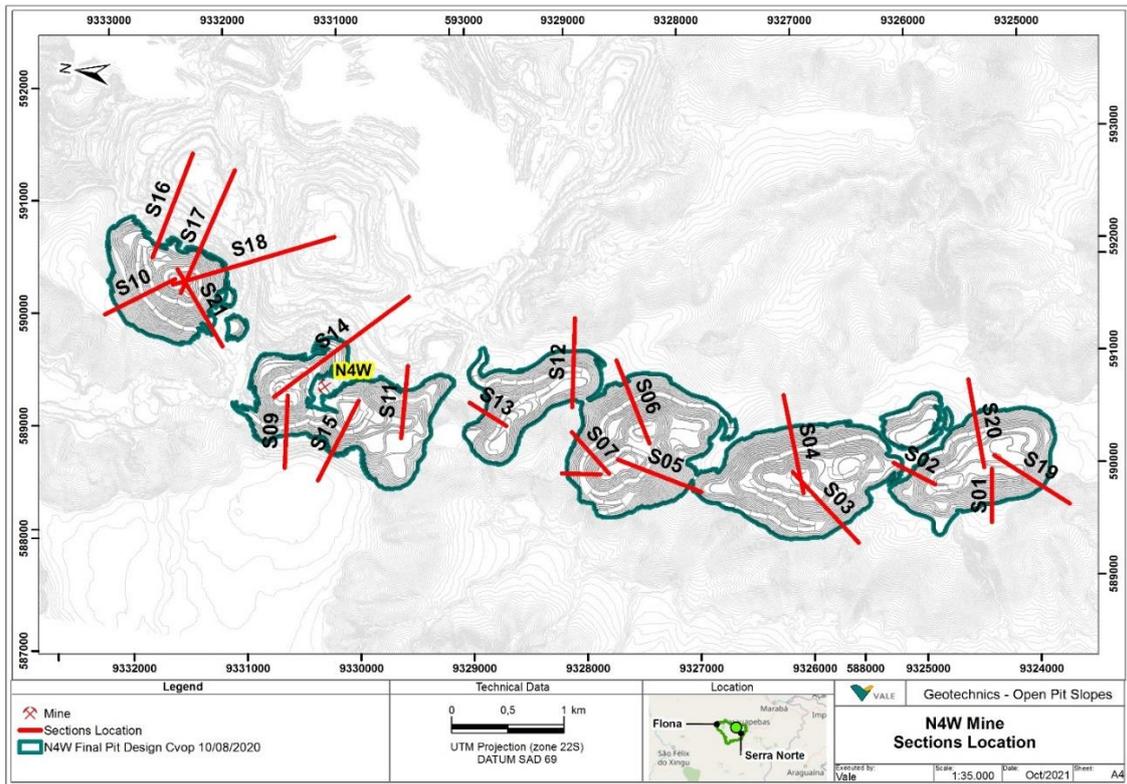
Taludes Geotécnicos de Cava a Céu Aberto
 Mina N3
 Localização das Seções
 Executado por:
 Escala:
 Data: Out/2021
 Folha:

Geotechnics Open Pit Slopes
 N3 Mine
 Sections Location
 Executed by:
 Scale:
 Date: Oct/2021
 Sheet:

Figura 13-9 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N3.

Tabela 13-5 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N3

Cava	Seção	Critérios aceitáveis		Resultados			
		FoS (obrigatório)	Interferência próxima à mina	FoS	Tipo de Superfície	Escala de Falha	Desencadeador de Falha
N3	S01	1,30	-	1,38	Não circular	Inter-rampa	Contato Geológico
	S02	1,30	-	1,30	Não circular	Inter-rampa	Contato Geológico
	S03	1,30	-	1,51	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S04	1,30	-	1,33	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S05	1,30	-	1,46	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S06	1,30	-	1,57	Não circular	Inter-rampa	Contato Geológico
	S07	1,30	-	1,60	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S08L	1,30	-	2,15	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S08R	1,30	-	2,40	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S09	1,30	-	1,33	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
S10	1,30	-	1,34	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta	



Legenda:

Legenda
Mina
Localização das Seções
Projeto de Cava Final N4W Cop 08/10/2020

Dados Técnicos
Projeção UTM (zona 22S)
DATUM SAD 69

Localização

Taludes Geotécnicos de Cava a Céu Aberto
Mina N4W
Localização das Seções
Executado por:
Escala:
Data: Out/2021
Folha:

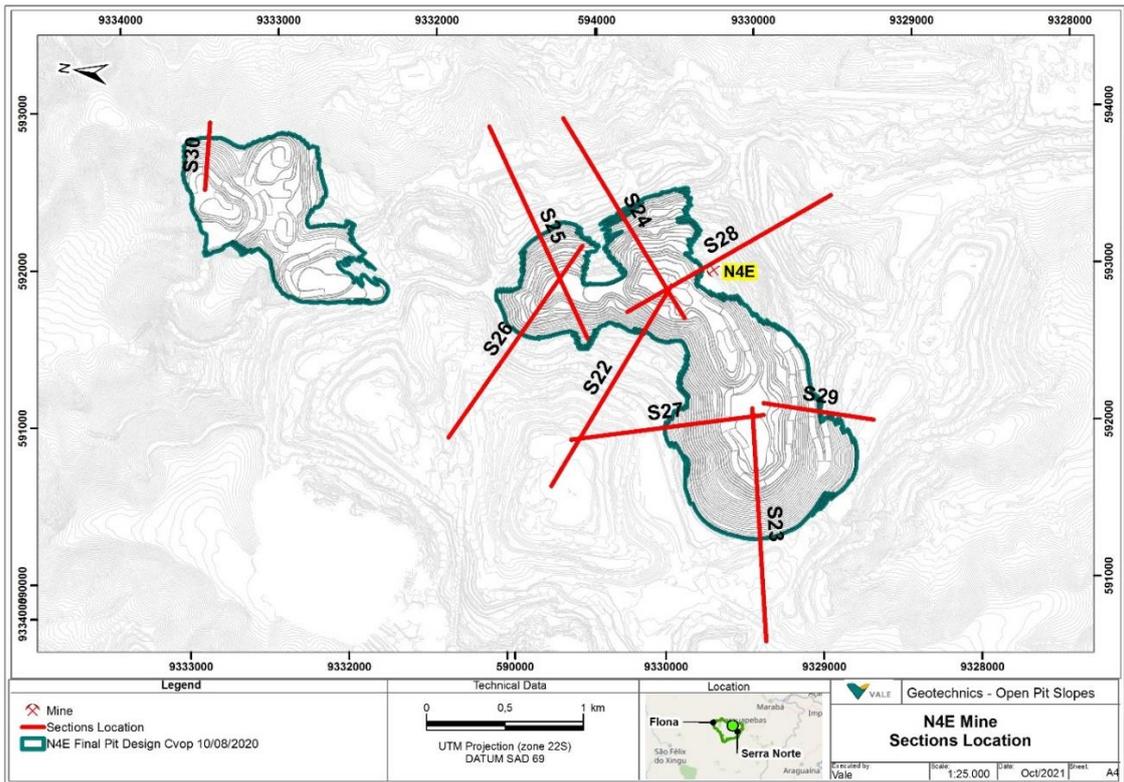
Legend
Mine
Sections Location
N4W Final Pit Design Cop 10/08/2020

Technical Data
UTM Projection (zone 22S)
DATUM SAD 69

Location

Geotechnics Open Pit Slopes
N4W Mine
Sections Location
Executed by:
Scale:
Date: Oct/2021
Sheet:

Figura 13-10 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N4W



Legenda:

Legenda
 Mina
 Localização das Seções
 Projeto de Cava Final N4E Cop 08/10/2020

Dados Técnicos
 Projeção UTM (zona 22S)
 DATUM SAD 69

Localização

Taludes Geotécnicos de Cava a Céu Aberto
 Mina N4E
 Localização das Seções
 Executado por:
 Escala:
 Data: Out/2021
 Folha:

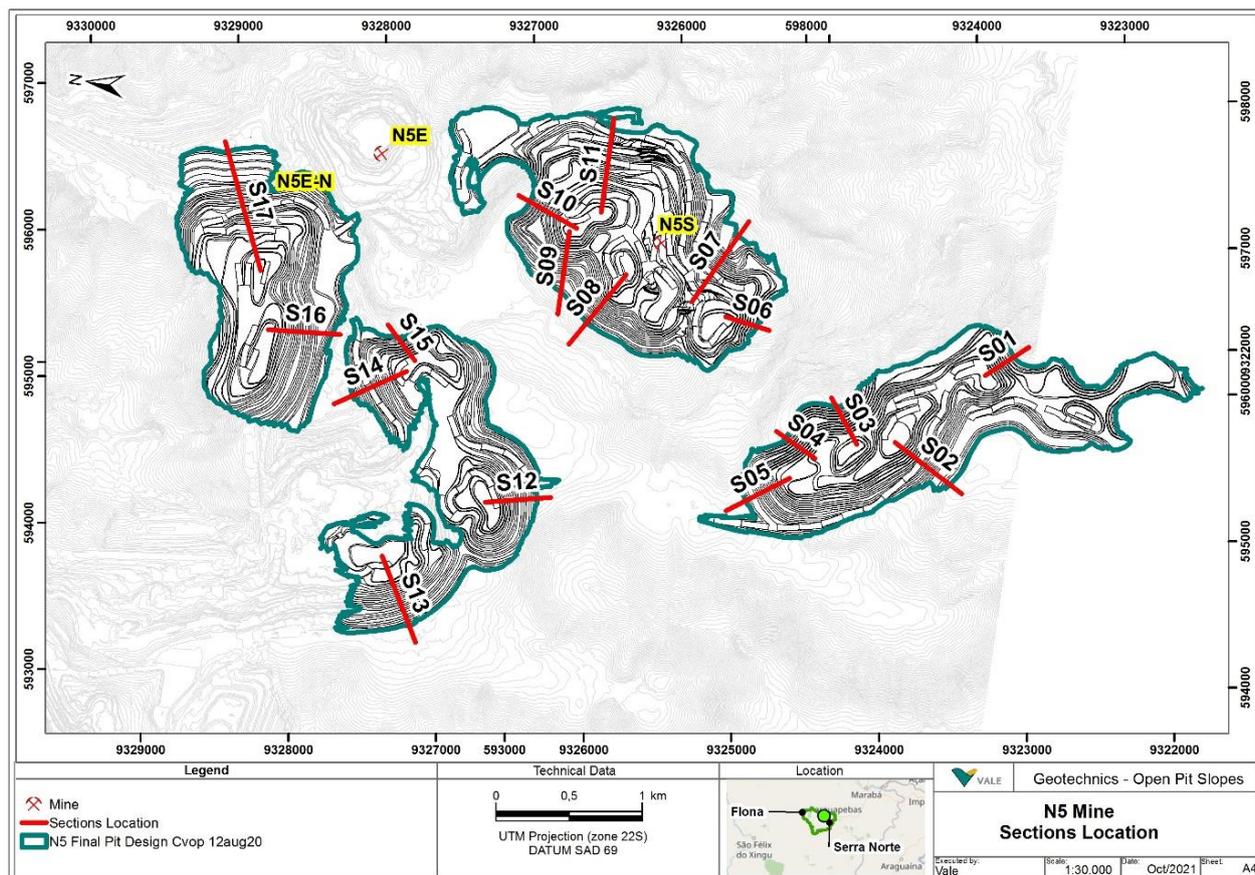
Legend
 Mine
 Sections Location
 N4E Final Pit Design Cop 10/08/2020

Technical Data
 UTM Projection (zone 22S)
 DATUM SAD 69

Location

Geotechnics Open Pit Slopes
 N4E Mine
 Sections Location
 Executed by:
 Scale:
 Date: Oct/2021
 Sheet:

Figura 13-11 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N4E.



Legenda:

Legenda
Mina
Localização das Seções
Projeto de Cava Final N5 Cop 12ago20

Dados Técnicos
Projeção UT (zona 22S)
DATUM SAD 69

Localização

Taludes Geotécnicos de Cava a Céu Aberto
Mina N5
Localização das Seções
Executado por:
Escala:
Data: Out/2021
Folha:

Legend
Mine
Sections Location
N5 Final Pit Design Cop 12ago20

Technical Data
UT Projection (zone 22S)
DATUM SAD 69

Location

Geotechnics Open Pit Slopes
N5 Mine
Sections Location
Executed by:
Scale:
Date: Oct/2021
Sheet:

Figura 13-12 - Localização da seção transversal da análise de estabilidade do talude - Mina N5

Tabela 13-6 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N4

Cava	Seção	Critérios aceitáveis		Resultados			
		FoS (obrigatório)	Interferência próxima à mina	FoS	Tipo de Superfície	Escala de Falha	Desencadeador de Falha
N4W	S01	1,30	-	1,36	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S02	1,30	-	2,59	Circular	Escala de bancada	Resistência da rocha intacta
	S03	1,30	-	1,38	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha

							intacta
	S04	1,30	-	2,05	Circular	Escala de bancada	Resistência da rocha intacta
	S05	1,30	-	1,35	Não circular	Inter-rampa	Zona de cisalhamento
	S06	1,30	-	2,08	Circular	Escala de bancada	Resistência da rocha intacta
	S07	1,30	-	1,48	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S08	1,30	-	1,51	Não circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S19	1,30	-	1,72	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S20	1,30	-	1,60	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S09	1,30	-	1,70	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S10	1,30	-	1,52	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S11	1,30	-	1,30	Não circular	Geral	Zona de cisalhamento
	S12	1,30	-	1,77	Circular	Escala de bancada	Resistência da rocha intacta
	S13	1,30	-	1,63	Não circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S14	1,30	-	1,30	Não circular	Inter-rampa	Zona de cisalhamento
	S15	1,30	-	1,34	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S16	1,50	Depósito de Resíduos	1,99	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S17	1,50	Depósito de Resíduos	1,51	Não circular	Escala de bancada	Zona de cisalhamento
	S18	1,50	Depósito de Resíduos	1,54	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S21	1,30	-	1,49	Não circular	Escala de bancada	Zona de cisalhamento
N4E	S22	1,50	Depósito de Resíduos	1,51	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S23	1,50	Depósito de Resíduos	1,50	Planar	Geral	Resistência da rocha intacta
	S24	1,50	Instalações industriais	1,69	Não circular	Inter-rampa	Zona de cisalhamento
	S25	1,30	-	2,06	Circular	Escala de bancada	Resistência da rocha intacta
	S26	1,50	Depósito de Resíduos	1,52	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S27	1,50	Depósito de Resíduos	2,64	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S28	1,30	Depósito de Resíduos	1,80	Não circular	Inter-rampa	Zona de cisalhamento
	S29	1,50	Depósito de Resíduos	2,18	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta

	S30	1,30	-	1,47	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
--	-----	------	---	------	----------	-------	------------------------------

Tabela 13-7 - Fator de segurança e outras informações do projeto final de talude da cava N5

Cava	Seção	Critérios aceitáveis		Resultados			
		FoS (obrigatório)	Interferência próxima à mina	FoS	Tipo de Superfície	Escala de Falha	Desencadeador de Falha
N5	S01	1,30	-	1,44	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S02	1,30	-	1,61	Não circular	Escala de bancada	Resistência da rocha intacta
	S03	1,30	-	1,47	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S04	1,30	-	1,47	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S05	1,30	-	1,76	Não circular	Escala de bancada	Resistência da rocha intacta
	S06	1,30	-	1,53	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S07	1,30	-	1,40	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S08	1,30	-	1,49	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S09	1,30	-	1,50	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S10	1,30	-	1,31	Planar	Escala de bancada	Massa rochosa anisotrópica
	S11	1,30	-	1,82	Não circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S12	1,30	-	1,30	Circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S13	1,30	-	1,51	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S14	1,30	-	1,44	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S15	1,30	-	1,55	Circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta
	S16	1,30	-	1,44	Não circular	Geral	Resistência da rocha intacta
	S17	1,50	Depósito de Resíduos	1,50	Não circular	Inter-rampa	Resistência da rocha intacta

13.4.5. Comentário sobre os resultados

As análises de estabilidade de taludes realizadas no complexo de minas de Serra Norte (N1, N2, N3, N4 e N5) obtiveram fator de segurança satisfatório, superior aos padrões internacionais mínimos (Read & Stacey, 2009). Portanto, a geometria proposta foi considerada geotecnicamente praticável.

13.5. Considerações hidrogeológicas

13.5.1. Modelos Hidrogeológicos N1 e N2

Esta simulação utilizou um modelo numérico FEFLOW (HIDROVIA, 2018) que engloba os platôs N1 e N2. O rebaixamento máximo simulado é de aproximadamente 190 m no meio da área (Figura 13-13).

A taxa de fluxo máxima de desaguamento simulado é de 670 m³/h. Dezesesseis pontos de monitoramento de nível de água foram considerados e a nRMS obtida foi de 2,32%, mostrando que o processo de calibração foi bem-sucedido.

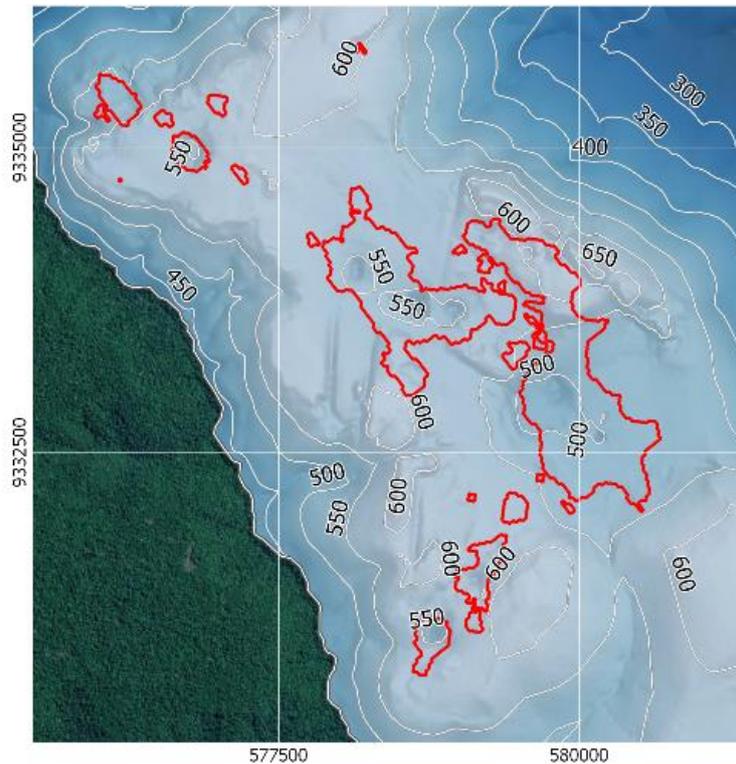


Figura 13-13 - Equipotenciais máximos de rebaixamento nas minas N1 e N2.

13.5.2. Modelo Hidrogeológico N3

A taxa de fluxo máxima de desaguamento simulado para o projeto N3 é de 539,6m³/h. Cinco pontos de monitoramento de nível de água foram considerados e a nRMS obtida foi de 9,84%, mostrando que o processo de calibração foi bem-sucedido.

As áreas onde o aquífero principal é menos expressivo, principalmente nas cavas central e norte, devem ter drenos horizontais ou poços especializados para promover a despressurização de taludes. A Figura 13-14 mostra os equipotenciais máximos de rebaixamento na mina N3.

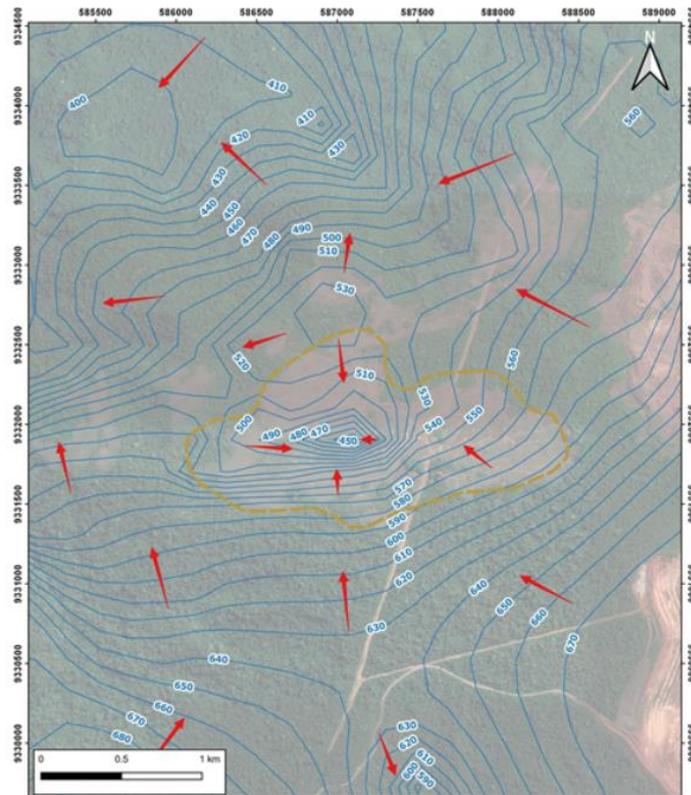


Figura 13-14 - Equipotenciais máximos de rebaixamento na mina N3.

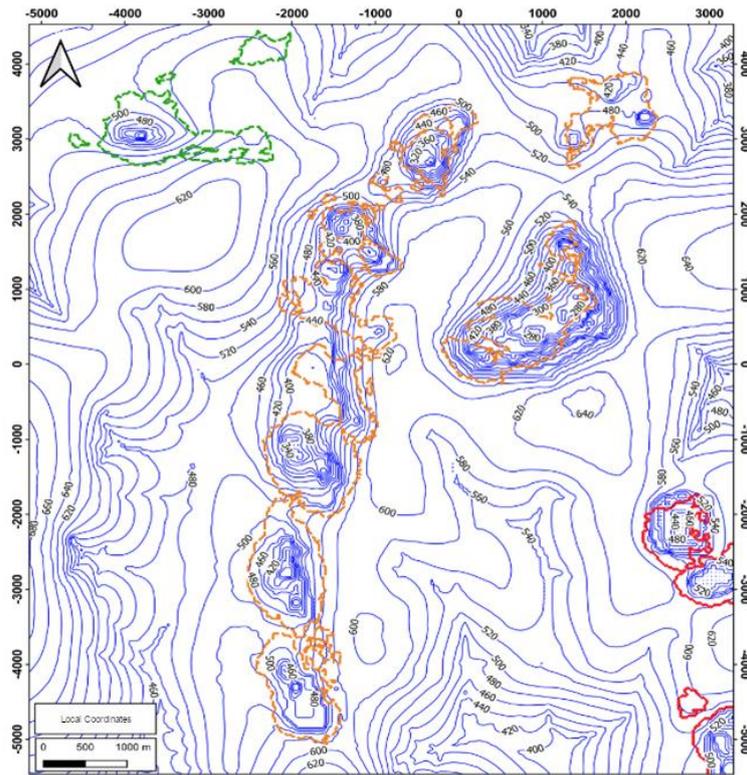
13.5.3. Modelos Hidrogeológicos N4 e N5

Para a mina N4, foi utilizado um modelo numérico MODFLOW (MDGEO, 2015) com 24 pontos de monitoramento de águas subterrâneas e nRMS de 1,8%.

A taxa de fluxo máxima de desaguamento era de 2.636m³/h para a mina N4. O equipotencial máximo de rebaixamento é exibido na Figura 13-15.

Para a mina N5, foi utilizado um modelo numérico MODFLOW (MDGEO, 2015) com 12 pontos de monitoramento de águas subterrâneas e nRMS de 2,5%.

A taxa de fluxo máxima de desaguamento era de 1.490m³/h para a mina N5. O equipotencial máximo de rebaixamento é exibido na Figura 13-16.

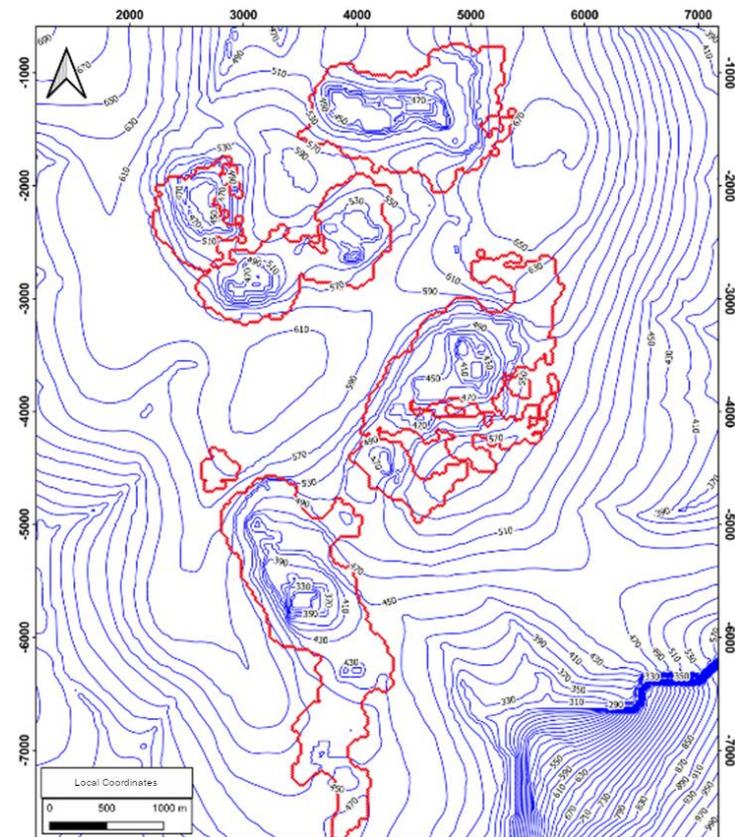


Legenda:

Coordenadas Locais

Local Coordinates

Figura 13-15 - Equipotenciais máximos de rebaixamento na mina N4



Coordenadas Locais

Figura 13-16 - Equipotenciais máximos de rebaixamento na mina N5.

13.11. Plano de vida útil da mina

O plano de vida útil da mina (LOM) é mostrado na Figura 13-17. A produção de 2022 a 2035 incluirá aproximadamente 1,5 Bt com teores médios de 65,7 % de FeGL, 1,4 % de SiO₂GL, 1,2 % de Al₂O₃GL, 0,046 % de PGL, 2,2 % de LOI. A relação estéril/minério para o LOM é 1..

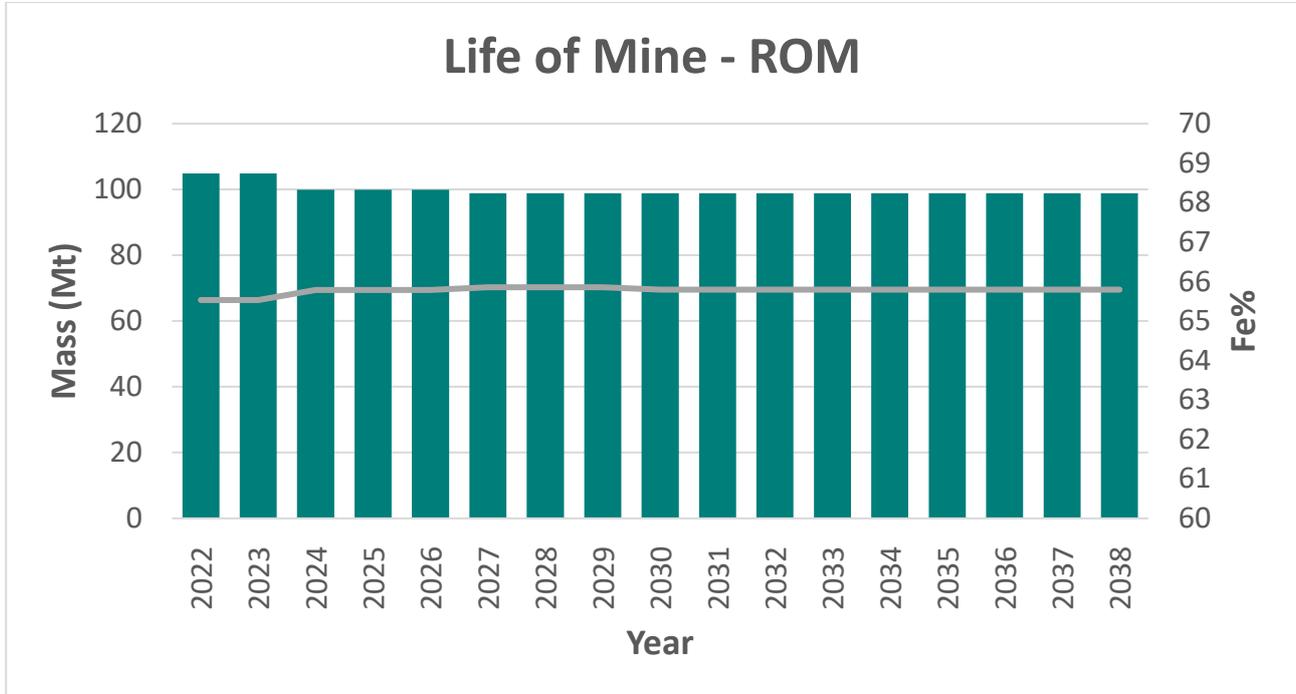


Figura 13-17 - Vida Útil da Mina vs Teores de Fe

Legenda:

Life of Mine – ROM	Vida útil da mina – Minério movimentado (ROM)
Massa (Mt)	Massa (Mt)
Year	Ano

13.12. Infraestrutura

13.12.1. Oficinas

Na área de Serra Norte, há uma Oficina de Manutenção completa (três unidades localizadas nas minas N5, N4W e Central) equipada com baias para equipamentos móveis de grande porte, bem como oficinas para usinagem, manutenção de geradores a diesel, elétrica, eletrônica, almoxarifado e ferramentaria. É construído em estrutura metálica e há um escritório e um vestiário anexos ao galpão, feito de alvenaria. Nas áreas adjacentes ao galpão da Oficina de Manutenção Geral, encontra-se a Baía de Lubrificação, a Baía de Lavagem de Veículos, a Loja de Pneus, a Estação de Reabastecimento de Veículos Pesados e Leves, o Estacionamento e o Pátio.

13.12.2. Laboratório

Todo o controle de qualidade do minério é realizado utilizando as estruturas do Laboratório da Mina de Ferro de Carajás, onde são realizados ensaios e testes físicos de toda a cadeia produtiva.

13.12.3. Escritórios

Os escritórios de alvenaria estão agrupados nas áreas administrativas da Vale S.A. e suas contratadas. É composto por escritórios de gestão, gestão sênior, coordenação, reuniões, técnicos, arquivos, recepção e banheiros, que atendem toda a equipe administrativa.

13.12.4. Almoxarifado

O almoxarifado, construído parcialmente de alvenaria e parcialmente de estrutura metálica, está rodeado por uma área exterior rodeada por portões. A área coberta inclui balcões de atendimento, escritórios e banheiros, e a área externa para armazenamento de materiais inclui atualmente anexos para o armazenamento de lubrificantes, combustíveis e pneus. O armazenamento de combustível é equipado com tanques horizontais para diesel filtrado, com bacias de drenagem e um sistema de separação água-óleo.

13.12.5. Refeitório

Há um refeitório que atende toda a equipe, tanto interna quanto terceirizada, e oferece almoço, jantar e lanches. Sua operação é terceirizada pela Vale como em outras unidades operacionais da empresa.

13.12.6. Clínica

A clínica está instalada em construção de alvenaria e destina-se a abrigar um pequeno escritório para cuidados de primeiros socorros e um banheiro. A clínica está equipada para atendimento de primeiros socorros, e os casos mais graves são encaminhados para o hospital existente no centro urbano, caso em que uma ambulância está disponível, estacionada ao lado com um motorista em prontidão permanente.

13.12.7. Sistema de combate a incêndio

A água de combate a incêndio é armazenada em tanques de concreto, divididos em dois compartimentos que permitem a limpeza do tanque, mantendo metade da reserva de água de incêndio disponível para uso.

13.12.8. Habitação

Parte da equipe de funcionários da empresa reside no centro urbano de Carajás, e parte, na cidade de Parauapebas, sem necessidade de construção de novos alojamentos na área industrial.

13.12.9. Equipamentos de mina

O requisito de pico para equipamentos de mineração primários e auxiliares é fornecido na Tabela 13-8.

Tabela 13-8 - Equipamentos de mineração

Equipamentos	Unidades
Carregamento	30
Transporte	116
Perfuração	17
Equipamento auxiliar	97

13.12.10. Força de trabalho

A força de trabalho da Serra Norte é composta por funcionários da empresa e contratadas. Os funcionários da Vale e as listas das principais contratadas para operações de mineração são apresentados na Tabela 13-9 e Tabela 13-10, respectivamente. O número de funcionários da Vale necessário para as operações de mineração não deve mudar significativamente no futuro próximo. O número de contratadas varia mês a mês, dependendo dos requisitos de trabalho no local da mina. A produção é realizada pelos funcionários da mina da empresa, enquanto as contratadas realizam os serviços auxiliares. A equipe administrativa trabalha com escala 5x2 em um turno de 8 horas, e a operação e a manutenção em escala 3x3 em um turno de 11 horas ou escala 4x2 em um turno de 10 horas.

Tabela 13-9 - Força de trabalho da Vale

Serra Norte	Gerente	Supervisor	Coordenador	Equipe e Especialista Técnico	Total
Mina	18	103	14	3.536	3.671
Planta	11	108	13	2.152	2.284
Outros	9	23	13	764	809
Total	38	234	38	6.452	6.764

Tabela 13-10 - Força de Trabalho da Contratada

Serra Norte (Contratadas)	Permanente	Projeto	Meio período	Total
Mina	442	178	75	695
Planta	591	51	23	665
Outros	1.347	1.714	214	3.275
Total	2.380	1.943	249	4.635

14. Métodos de processamento e recuperação

14.1. Resumo

Existem 3 plantas de processamento no local da mina de Serra Norte: Planta I, Planta II e Planta III. A Planta I tem a maior capacidade de processamento em Carajás (85 Mta) e recebe minério de BSMs (britadores semimóveis) 2, 3 e 4 e de britadores primários. Parte do ROM da planta é processado úmido e outra parte umidade natural. Lump, Sinter Feed e Pellet Feed são produzidos nesta planta, com recuperação em massa de cerca de 93%.

Há um projeto em andamento para adaptar a Planta I para processamento de umidade 100% natural. Este projeto está previsto para ser concluído entre 2024 e 2025.

A Planta II processa ROM em umidade natural e pode produzir 40 Mta. Esta planta recebe ROM de BSM 05, gerando apenas Sinter Feed, com 100% de recuperação.

A capacidade da Planta III é de 20 Mta e consiste em duas linhas denominadas de novo peneiramento 2 e 6. O ROM é processado à umidade natural, o material acima de 19 mm é removido desta planta e alimentado na Planta I, porque não há britagem nesta planta e o material menor que 19 mm representa o produto Sinter Feed, com uma recuperação em massa em torno de 92%. A Tabela 14-1 mostra as recuperações médias de massa, utilização e capacidades de cada planta de processamento.

Tabela 14-1 - Recuperações, Utilização e Capacidades da Planta

Planta	Recuperação Metalúrgica (%)	Utilização Física (%)	Capacidade Nominal (Mta)
Planta 1	96 a 97	73,1	85,0
Planta 2	100	79,2	40,0
Planta 3	95 a 97	52,7	20,0

14.2. Planta I

A Planta I é a maior de Carajás, com uma capacidade de produção de aproximadamente 85 Mta. Consiste em britagem, peneiramento, classificação e concentração magnética, e produz os produtos Lump, Sinter Feed e Pellet Feed.

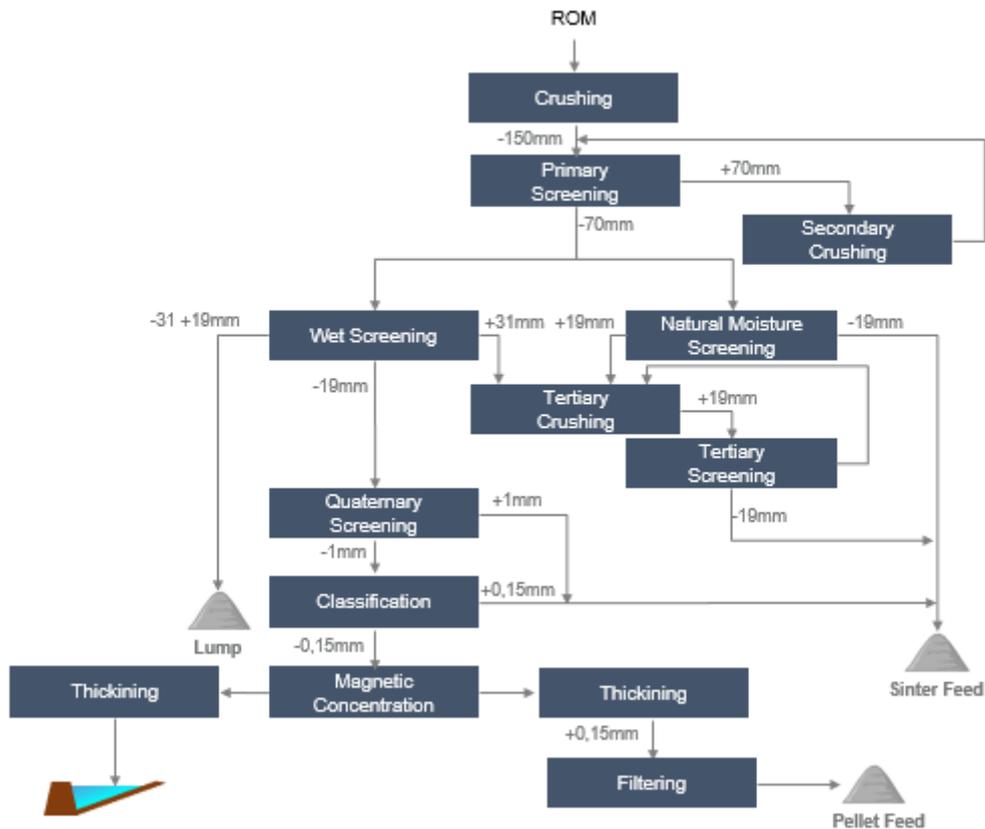
A britagem primária da Planta I consiste em um sistema de britador fixo e quatro britadores semimóveis, denominados BSM 2, 3, 4, e, como alternativa, BSM 5.

Após a britagem primária, o material é direcionado para o peneiramento primário, no qual a peneira de maior tamanho (+ 70 mm) é direcionada para a britagem secundária. O produto do britador secundário retorna ao peneiramento primário, fechando o circuito. O tamanho menor (-70 mm) é enviado para o peneiramento secundário, com 17 linhas, 11 operando em molhado e 6 em umidade natural.

Nas linhas de umidade natural, o tamanho menor (-19 mm) é considerado o produto Sinter Feed e o tamanho maior (-19 mm) é direcionado para o britador terciário. O produto do britador terciário é direcionado para o peneiramento terciário em que o tamanho maior retorna para a britagem terciária, fechando o circuito e o tamanho menor é considerado produto Sinter Feed.

No peneiramento úmido, o material retido no primeiro nível (+31,5 mm) é enviado para o mesmo britador terciário descrito anteriormente. O material entre 31,5 mm e 19 mm é considerado o produto Lump e o material abaixo de 19 mm é direcionado para o peneiramento quaternário. No peneiramento quaternário, a fração acima de 1 mm é considerada como produto Sinter Feed. A fração abaixo de 1 mm é direcionada para classificação que consiste em classificadores em espiral.

O produto de fundo (fração mais espessa) dos classificadores em espiral (-1 mm + 0,15 mm) é considerado Sinter Feed, e o produto de topo é direcionado para a concentração magnética. O concentrado da concentração magnética, após um estágio de espessamento, é direcionado para a filtragem em disco e filtros de prensa e o produto Pellet Feed é obtido. A rejeito é direcionado para a barragem após o estágio de espessamento. A Figura 14-1 mostra o fluxograma da Planta I. A atual recuperação em massa da Planta I é de 93%.



Legenda:

		Britagem		
		Peneiramento Primário		
				Britagem Secundária
	Peneiramento Úmido		Peneiramento de Umidade Natural	
		Britagem Terciária		
			Peneiramento Terciário	
	Peneiramento Quaternário			
	Classificação			
Espessamento	Concentração Magnética	Espessamento		Sinter Feed
		Filtragem		Pellet Feed

		Crushing		
		Primary Screening		
				Secondary Crushing
	Wet Screening		Natural Moisture Screening	
		Tertiary Crushing		
			Tertiary Screening	
	Quaternary Screening			
	Classification			

<i>Thickining</i>	<i>Magnetic Concentration</i>	<i>Thickining</i>		<i>Sinter Feed</i>
		<i>Filtering</i>		<i>Pellet Feed</i>
			Britagem	
			Peneiramento Primário	
				Britagem Secundária
	Peneiramento Úmido			Peneiramento de Umidade Natural
			Britagem Terciária	
				Peneiramento Terciário
	Peneiramento Quaternário			
	Classificação			
Espessamento	Concentração Magnética		Espessamento	Sinter Feed
			Filtragem	Pellet Feed

		<i>Crushing</i>		
		<i>Primary Screening</i>		
				<i>Secondary Crushing</i>
	<i>Wet Screening</i>		<i>Natural Moisture Screening</i>	
		<i>Tertiary Crushing</i>		
			<i>Tertiary Screening</i>	
	<i>Quaternary Screening</i>			
	<i>Classification</i>			
<i>Thickining</i>	<i>Magnetic Concentration</i>	<i>Thickining</i>		<i>Sinter Feed</i>
		<i>Filtering</i>		<i>Pellet Feed</i>

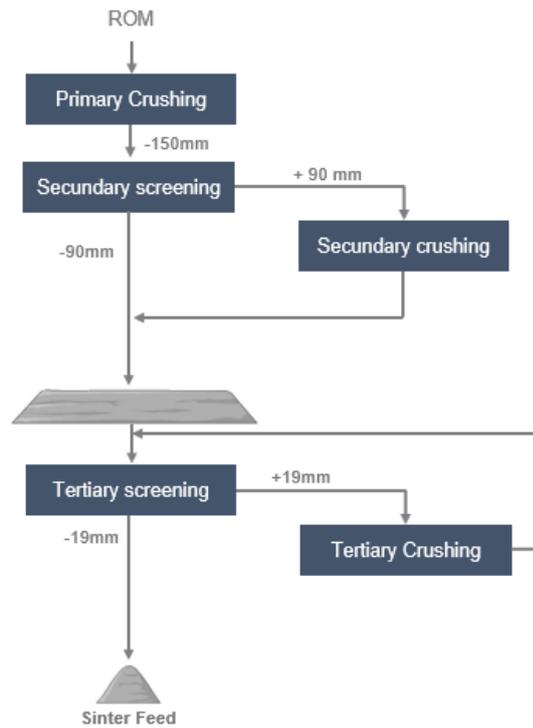
Figura 14-1 - Fluxograma da Planta I

14.3. Planta II

A Planta II tem capacidade para 40 Mta e consiste em operações de britagem e peneiramento para produzir o produto Sinter Feed com recuperação em massa de 100%.

A Planta II é alimentada exclusivamente pelo britador semimóvel 5 (BSM 5). O produto do britador é enviado para o britador secundário, por meio de quatro esteiras transportadoras de longa distância (3,8 km de comprimento).

Após a britagem primária, o minério é direcionado para o peneiramento secundário e o material maior que 90 mm (tamanho maior) é direcionado para o britador secundário. O produto do britador secundário e o tamanho menor do peneiramento secundário são direcionados para o pátio de homogeneização e, subsequentemente, direcionados para o peneiramento terciário. O tamanho maior (+ 19 mm) é direcionado para o britador terciário no qual o produto da britagem retorna para o peneiramento terciário. O tamanho menor é considerado produto Sinter Feed. A Figura 14-2 mostra o fluxograma da Planta II.



Legenda:

Britagem Primária
Peneiramento secundário
Britagem secundária

Peneiramento terciário
Britagem Terciária

Sinter Feed

Primary Crushing
Secondary screening
Secondary crushing

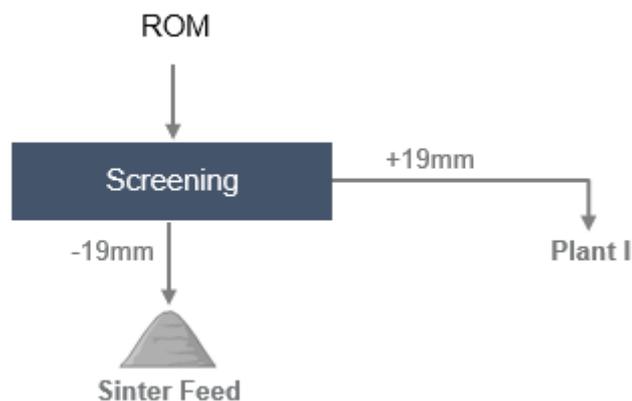
Tertiary screening
Tertiary Crushing

Sinter Feed

Figura 14-2 - Fluxograma da Planta II

14.4. Planta III

A Planta III consiste em duas plantas, denominadas Novo Peneiramento 2 e Novo Peneiramento 6. A capacidade de produção dessas duas plantas é de 20 Mta. O material menor que 19 mm é considerado produto Sinter Feed, e o material maior que 19 mm alimenta a Planta I. A Figura 14-3 mostra o fluxograma da Planta III, ambas as plantas têm o mesmo fluxograma.



ROM – minério movimentado
 Peneiramento
 Planta I
 Sinter Feed

ROM
 Screening
 Plant I
 Sinter Feed

Figura 14-3 - Fluxograma da Planta III

14.5. ROM, produção, recuperação, qualidade e equipamento

A Tabela 14-2 resume a atual produção, qualidade e recuperação das Plantas I, II e III, e a Tabela 14-3 resume a lista principal dos equipamentos de processo para cada planta.

Tabela 14-2 - ROM, produção, recuperação e qualidade realizados

Ano	Produção (Mt)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Recuperação em Massa (%)
2016	143,6	65,35	1,74	94,4
2017	142,7	65,37	1,90	96,2
2018	131,5	65,00	2,22	94,7
2019	115,3	65,33	1,79	95,3
2020	109,1	65,18	2,09	95,7

Tabela 14-3 - Lista de equipamentos das Plantas I, II e III

Planta	Operação unitária	Quantidade	Tipo de Equipamento	Dimensões/Modelo
BSM 2	Britagem Primária	1	Britador de mandíbulas	CJ815
BSM 3	Britagem Primária	1	Britador de mandíbulas	C160
BSM 4	Britagem Primária	1	Britador de mandíbulas	CJ815
BSM 5	Britagem Primária	1	Britador de mandíbulas	CJ 815
Planta I	Britagem Primária	1	Britador giratório	48" x 74"
Planta I	Peneiramento Primário	8	Peneira vibratória	8' x 21'
Planta I	Britagem Secundária	4	Britador de cone	17" x 84" (3) CS660 (1)
Planta I	Peneiramento Secundário	17	Peneira vibratória	8' x 21'
Planta I	Peneiramento Terciário	6	Peneira vibratória	10 x 20 (2), 8 x 20 (1) e 8 x 21 (3)
Planta I	Britagem Terciária	6	Britador de cone	HP500
Planta I	Classificador em espiral	6	-	84"
Planta I	Deslamagem rougher	100	Hidrociclone	10"

Planta I	Deslamagem scavenger	500	Hidrociclone	4"
Planta I	Espessamento de Rejeitos	2	Espessador	Diâmetro: 80 m
Planta I	Espessamento Concentrado	3	Espessador	Diâmetro: 26 m (2) Diâmetro: 34 (1)
Planta I	Filtro	8	Filtro de Disco	Área 100 m ²
Planta I	Filtro	12	Filtro de Prensa	10 (132 m ²) 2 (80 m ²)
Planta II	Britagem Secundária	1	Britador cônico	CH895
Planta II	Peneiramento Secundário	10	Peneira vibratória	8' x 32'
Planta II	Britagem Terciária	6	Britador de cônico	HP500
Planta III	Peneiramento	8	Peneira vibratória	8' x 20'

14.6. Logística

A mina de Serra Norte está integrada ao sistema de mina-ferrovia-porto.

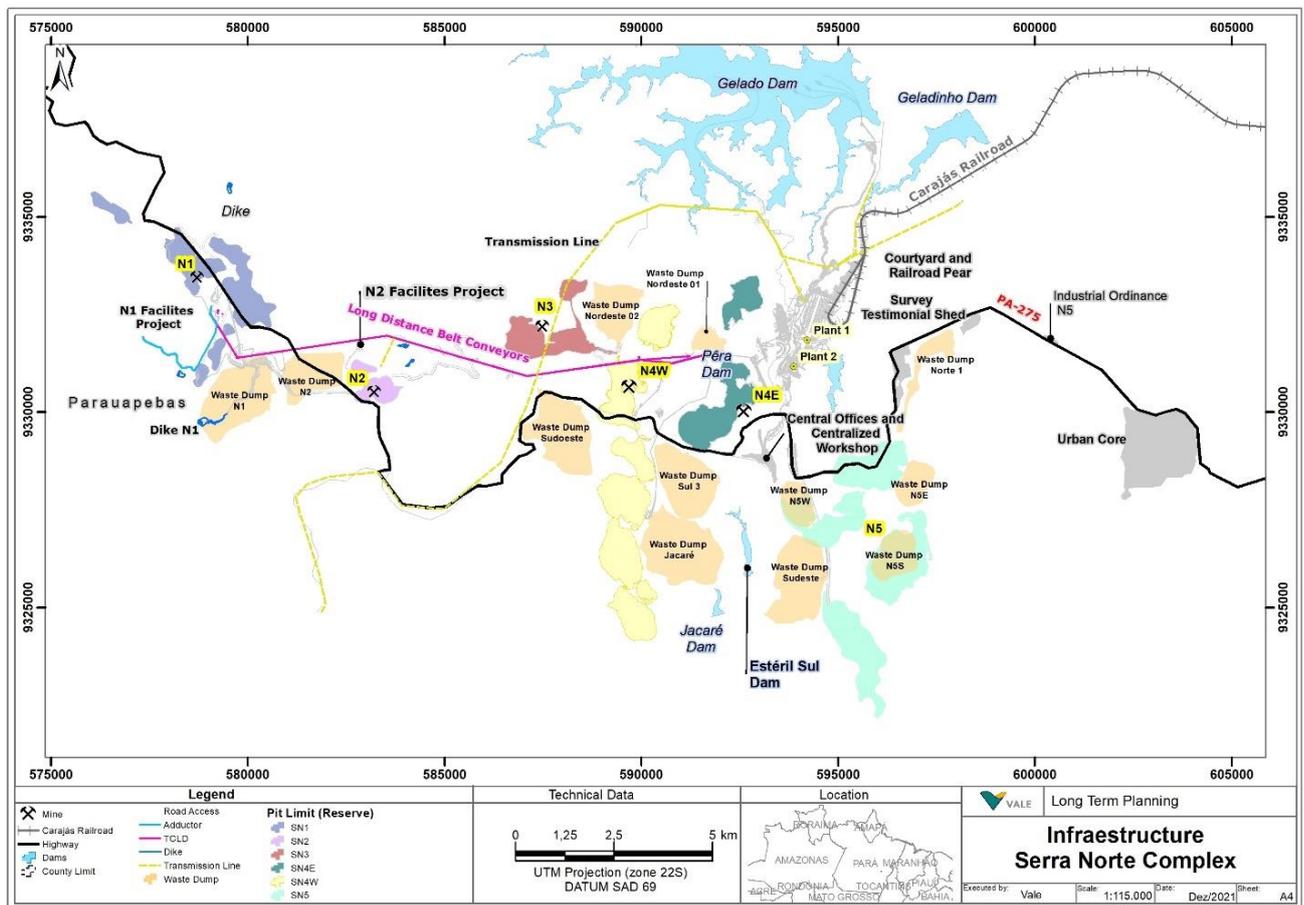
A ferrovia EFC ("Estrada de Ferro Carajás") conecta os complexos produtivos de Serra Norte (Mina de Carajás), Serra Sul (Mina S11D) e Serra Leste, todos localizados no estado brasileiro do Pará, ao complexo portuário da Ponta da Madeira, em São Luís, Estado do Maranhão. Os trens são carregados no terminal de Carajás ou no terminal Serra Sul. O processo de descarregamento ocorre no terminal da Ponta da Madeira.

Conectado à EFC, o Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM) está localizado próximo à cidade de São Luís, no Estado do Maranhão. A configuração do porto permite a operação de navios de alta capacidade, como o Valemax.

15. Infraestrutura

Um plano de superfície mostrando a infraestrutura do local da mina é fornecido na Figura 15-1. A infraestrutura operacional e in-situ na Serra Norte inclui o seguinte:

- Três minas de lavra a céu aberto que são acessadas por aproximadamente 10 rampas principais;
- Estoques de minério de superfície e depósitos de estéril de rocha;
- Três plantas de processamento com um total de 130 Mtpa de alimentação do britador;
- Um TSF;
- Fornecimento de energia do local principal;
- Estradas de acesso ao local;
- Oficinas, escritórios, instalações de almoxarifado da mina.



Legenda:

- | | |
|---|------------------------------|
| Dique | Dique |
| Projeto de Instalações N1 | N1 Facilities Project |
| Depósito de Estéril N1 | Waste Dump N1 |
| Dique N1 | Dike N1 |
| Depósito de Estéril N2 | Waste Dump N2 |
| Projeto de Instalações N2 | N2 Facilities Project |
| Correias Transportadoras de Longa Distância | Long Distance Belt Conveyors |
| Linha de Transmissão | Transmission Line |
| Depósito de Estéril Sudoeste | Waste Dump Sudoeste |
| Depósito de Estéril Nordeste 01 | Waste Dump Nordeste 01 |
| Depósito de Estéril Nordeste 02 | Waste Dump Nordeste 02 |
| Depósito de Estéril Sul 3 | Waste Dump Sul 3 |

Depósito de Estéril Jacaré
Depósito de Estéril N5W
Depósito de Estéril Sudeste
Escritórios Centrais e Oficina Centralizada
Pátio e Ferrovia Pera
Galpão de Testemunho de Sondagem
Planta 1
Planta 2 Depósito de Estéril Norte 1
Depósito de Estéril N5E
Depósito de Estéril N5S

Decreto Industrial N5
Núcleo Urbanizado

Legenda

Mina
Estrada de Ferro Carajás
Estrada
Barragens
Limite do Município
Acesso Rodoviário
Adutora
TCLD
Dique
Linha de Transmissão
Depósito de Estéril

Limite da Cava (Reserva)

Dados Técnicos

Projeção UT (zona 22S)
DATUM SAD 69

Localização

Planejamento de Longo Prazo
Infraestrutura
Complexo Serra Norte
Executado por:
Escala:
Data: Dez/2021
Folha:

Waste Dump Jacaré
Waste Dump N5W
Waste Dump Sudeste
Central Offices and Centralized Workshop
Courtyard and Railroad Pear
Survey Testimonial Shed
Plant 1
Plant 2 Waste Dump Norte 1
Waste Dump N5E
Waste Dump N5S

Industrial Ordinance N5
Urban Core

Legend

Mine
Carajas Railroad
Highway
Dams
County Limit
Road Access
Adductor
TCLD
Dike
Transmission Line
Waste Dump

Pit Limit (Reserve)

Technical Data

UT Projection (zone 22S)
DATUM SAD 69

Location

Long Term Planning
Infrastructure
Serra Norte Complex
Executed by:
Scale:
Date: Dez/2021
Sheet:

Figura 15-1 – Mapa da infraestrutura.

15.1. Acesso ao local

Fornecido no capítulo 3.

15.2. Fonte de energia

O complexo operacional Serra Norte (Carajás) é totalmente fornecido pelo sistema Interconectado Nacional (SIN) e é conectado por 230 kV através de duas linhas de transmissão à Subestação Carajás de propriedade da Eletronorte (Eletrobrás).

O sistema de distribuição interna é realizado por meio de redes de 34,5KV da Vale. O consumo em 2020 foi de cerca de 468.794 MWh, 68,9% dos quais alimentaram as plantas de processamento mineral, 27,6% foram distribuídos para as minas N4/N5 e os 3,6% restantes foram consumidos pelo Centro Urbano e outras estruturas de apoio.

15.3. Abastecimento de água

Atualmente, nas minas de N4E, N4W e N5, existem 39 poços em nível inferior em operação com capacidade de fluxo de cerca de 3.800 m³/h. O principal objetivo do bombeamento é reduzir os níveis de água das minas, 95% do volume bombeado é liberado nas drenagens ao redor das minas

e os outros 5% são usados no processo industrial, no abastecimento humano e no controle de poeira.

15.3.1. Fornecimento e coleta de água industrial

O consumo de água é estimado em 0,232m³/tonelada de ROM com uma taxa de reutilização de 69,60%. As bacias hidrográficas são provenientes das barragens de Gelado e Pera.

15.3.2. Sistema de abastecimento de água potável

Toda a água potável utilizada para abastecer as minas vem de poços em nível inferior da mina. A água, após o tratamento na Estação de Tratamento de Água (ETA), é enviada para as unidades de consumo através do bombeamento e de uma rede de pressão, armazenada em reservatórios que são periodicamente limpos.

A água dos poços em nível inferior é utilizada para lavagem de pisos e equipamentos e para consumo humano, utilizados em banheiros e refeitórios. A Vale também utiliza água em seu processo industrial, e essa água é coletada diretamente das barragens de Igarapé Gelado e Pêra.

15.4. Edifícios do local

As instalações do local estão distribuídas ao redor das minas na Serra Norte. As instalações incluem escritórios, áreas de armazenamento e almoxarifado, lojas de manutenção, postos de combustível, plantas de processamento, refeitório e vestiário.

15.5. Gerenciamento de estéril da mina e rejeitos

15.5.1. Introdução

A operação e o desenvolvimento de projetos para eliminação de depósitos de resíduos e rejeitos seguem as melhores práticas nacionais e internacionais. Neste relatório, os depósitos de estéril de rocha e rejeitos serão representados pelo acrônimo "PDE".

15.5.2. Gerenciamento de rejeitos

A Planta 1 gera de 4 a 5 Mton de rejeitos por ano na Serra Norte. Os Rejeitos passam por um espessador antes de serem bombeados para TSF para facilitar a reutilização da água de processo.

15.5.3. Instalação de armazenamento de rejeitos

De acordo com o relatório da GEOESTÁVEL (Mar./2020), a barragem de Gelado está localizada na Mina de Serra Norte, Complexo Carajás, na cidade de Parauapebas (PA). Na margem à esquerda do reservatório, encontra-se também o dique de selamento 06. A barragem de Gelado foi construída para fornecer água de processo para a Planta de Processamento de Minério de Ferro, para conter rejeitos das plantas de processamento de mina de N4 e N5 e para conter sedimentos de depósitos de estéril de rocha.

De acordo com o relatório da GEOESTÁVEL (Dez./2019), a barragem de Gelado foi implementada em três estágios. O volume de projeto desta estrutura é de cerca de 152,9 Mm³.

Para o monitoramento geotécnico das barragens, as inspeções de campo são realizadas a cada duas semanas, monitoramento automático com piezômetros, medidor de nível de água, prismas, marcas de superfície, inclinômetro, câmeras de CCTV e radar orbital são utilizados.

15.5.4. Depósitos de estéril

A rocha estéril das operações de lavra a céu aberto é depositada nos locais da mina:

Tabela 15-1- Depósito de Resíduos em operação

Depósito de Estéril	VOLUME Mm ³
PDE JACARÉ	107,0
PDE N5 LESTE	7,9
PDE N5W	70,5
PDE NORTE 1	0,5
PDE NOROESTE 1	2,0
PDE NOROESTE 2	76,0
PDE SUL 3	200,0

A região prevista para a construção de PDE N1 está localizada na Mina Serra Norte, Complexo Carajás. De acordo com o relatório RL-1190KN-X-87572 (GEOESTÁVEL, Mar./2020), PDE N1 contribuirá para a continuidade operacional do Complexo de Mineração de Ferro de Carajás, formado pelo estéril do processo de mineração na cava N1. O volume previsto de deposição de estéril nesta estrutura é de 41,9 Mm³. De acordo com o mesmo relatório, está previsto um sistema de contenção de sedimentos, incluindo um reservatório e um tanque de clarificação para este depósito de estéril de rocha.

A região prevista para a construção de PDE N2 está localizada próxima à PDE N1 na Mina Serra Norte do Complexo Carajás. De acordo com o relatório RL-1190KN-X-87573 (GEOESTÁVEL, Mar./2020), PDE N2 será formado de estéril da cava N2, com um sistema de contenção de sedimentos incluindo um reservatório e um tanque de clarificação. O volume de resíduos é estimado em 24,1 Mm³.

O PDE Sudoeste (N4W) está localizado na Mina de Serra Norte e será construído para depósito de estéril em conformidade com o Plano Diretor. O projeto conceitual está sendo desenvolvido atualmente, com previsão para conclusão em agosto de 2022. O volume estimado de estéril é de 203,9 Mm³.

O PDE Sudoeste (N5) está localizado na Mina de Serra Norte e será construído para depósito de estéril da cava N5, em conformidade com o Plano Diretor. O projeto conceitual está sendo desenvolvido atualmente, com previsão para conclusão em agosto de 2022. O volume de estéril é estimado em 260,8 Mm³. Outros projetos em desenvolvimento são apresentados na Tabela 15-2.

Tabela 15-2 - Depósito de Resíduos em desenvolvimento

Depósito de Estéril	VOLUME Mm ³
PDE Jacaré Expansão	194,2
PDE N1 - Fase 02 (Eng.)	45,5
PDE N2 - Fase 02 (Eng.)	23,8
PDE Sudoeste N4W	203,9
PDE Sudoeste N5	260,8
PDE Sul N5 - SN 09	799,0

16. Estudos de mercado

16.1. Mercados

16.1.1. Introdução

O minério de ferro é um dos principais produtos comercializados globalmente pela Vale. Seus preços e prêmios podem flutuar ao longo do ano de acordo com as mudanças no equilíbrio entre sua oferta e demanda e tendências de curto prazo no sentimento do mercado.

A Vale opera quatro sistemas no Brasil de produção e distribuição de minério de ferro, que chamamos de Sistemas Norte, Sudeste, Sul e Centro-Oeste. Cada um dos Sistemas Norte e Sudeste está totalmente integrado, composto por minas, ferrovias, terminais marítimos e um porto. O Sistema Sul é composto por dois complexos minerários e dois terminais marítimos.

Sob a recuperação econômica da pandemia, os preços do minério de ferro enfrentaram um aumento de preços no primeiro semestre de 2021, à medida que a recuperação da demanda ultrapassa em grande parte a oferta. Na segunda parte do ano, as crises energéticas nos principais mercados ajudaram a equilibrar a demanda e a oferta a aproximar os preços do minério de ferro do seu suporte de custos.

16.1.2. Demanda

A China tem sido o principal motor da demanda global por minerais e metais nas últimas décadas. Em 2021, a demanda chinesa representou 74% da demanda global por minério de ferro marítimo. Portanto, qualquer contração do crescimento econômico da China ou mudança em seu perfil econômico poderia resultar em menor demanda por nossos produtos, levando a menores receitas, fluxo de caixa e rentabilidade.

Em 2021, a produção de aço bruto da China foi de 1032,79 Mt, uma queda de -3% em relação ao ano anterior. A recuperação econômica no país continuou em 2021, com a taxa de crescimento do PIB alcançando 8,1% em relação ao ano anterior em vs. 2020. A produção industrial e as exportações continuaram superando no quarto trimestre de 2021. O crescimento do PIB no quarto trimestre de 2021 atingiu 4,0% em relação ao ano anterior, desacelerando de 4,9% em relação ao terceiro trimestre de 2021, com a moderação do Investimento em Ativos Fixos (Fixed Asset Investment - FAI) no quarto trimestre impulsionado por propriedade e infraestrutura. No resto do mundo, a flexibilização das restrições com a implantação de vacinas, a recuperação da atividade econômica, a melhoria da manufatura e da cadeia de suprimentos em 2021 contribuiu para a demanda de aço, levando a uma produção total de aço de 879,1Mt, um aumento de 12,1% em relação ao ano anterior. As principais regiões produtoras de aço, como Brasil e UE28, recuperaram-se totalmente em relação aos níveis pré-pandemias de 2019, enquanto o JKT e os EUA ainda estão ligeiramente abaixo dos níveis pré-pandemias.

O movimento em direção a uma indústria siderúrgica mais eficiente, com a aplicação de políticas ambientais mais rigorosas na China, deve apoiar a demanda por minérios de alta qualidade que permitam produtividade e níveis mais baixos de emissão, como pelotas e multas de Carajás (COIJ). Para 2022, a Associação Mundial do Aço (World Steel Association - WSA) previu em outubro de 2021 que a demanda de aço deve crescer 2,2%, para 1.896,4Mt. Espera-se que a demanda continue e fortaleça seu impulso de recuperação após a redução dos gargalos da cadeia de suprimentos, a demanda reprimida contínua e o aumento da confiança dos negócios e dos consumidores.

Na China, um setor imobiliário mais fraco e metas ambientais governamentais podem limitar o crescimento da produção de aço em 2022. Embora o aumento da inflação e a desaceleração da demanda na China possam apresentar um risco negativo, o progresso nas vacinas em todo o mundo e as novas variantes potenciais serem menos prejudiciais e disruptivas em comparação com as ondas anteriores podem apoiar a tendência de recuperação.

No longo prazo, a desaceleração do crescimento econômico da China pode impactar a demanda de minério de ferro.

16.1.3. Oferta

Os mercados globais de minério de ferro e de pelotas de minério de ferro são altamente competitivos. Os principais fatores que afetam a concorrência são preço, qualidade e gama de produtos oferecidos, confiabilidade, custos operacionais e custos de transporte.

Nossos principais concorrentes são locais diferentes dos nossos sites e competem com a Vale principalmente em seus mercados regionais. Para o mercado asiático, os principais concorrentes estão na Austrália e incluem subsidiárias e afiliadas da BHP, Rio Tinto Ltd ("Rio Tinto") e Fortescue Metals Group Ltd. Para o mercado europeu, nossos principais concorrentes são Luossavaara Kiirunavaara AB ("LKAB"), ArcelorMittal Mines Canada Inc., Iron Ore Company of Canadá, uma subsidiária da Rio Tinto, Kumba Iron Ore Limited e Société Nationale Industrielle et Minière. A Vale também tem concorrentes no mercado brasileiro. Vários pequenos produtores de minério de ferro, algumas siderúrgicas, incluindo Gerdau S.A. ("Gerdau"), Companhia Nacional ("CSN"), Vallourec Tubos do Brasil S.A., Usiminas e ArcelorMittal, competem para alimentar minério de ferro para a produção de aço local.

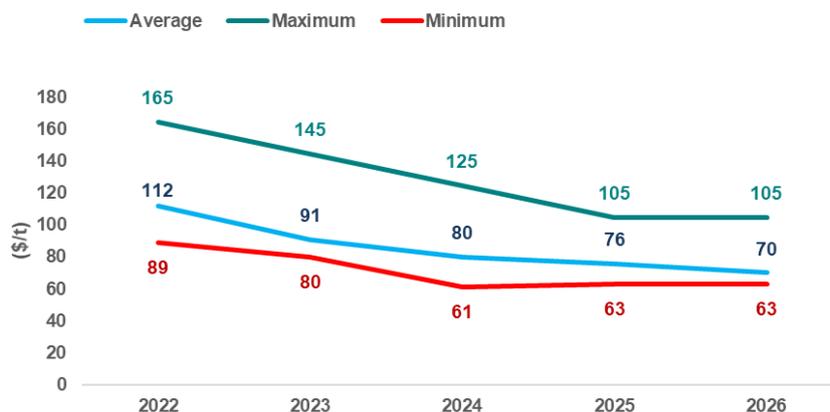
Enquanto para 2022 não há adição relevante da capacidade de minério de ferro dos principais concorrentes, a longo prazo a oferta global pode enfrentar redução da oferta devido à exaustão das operações atuais, especialmente para os minérios com menor custo e maior qualidade. Além disso, para o abatimento da produção, como várias reservas de minério de ferro estão localizadas em países diferentemente da nacionalidade da mineradora, o risco de nacionalização das reservas e operações está presente, como aconteceu no passado, já que novas fronteiras de minério de ferro precisarão ser exploradas para atender à demanda global.

16.1.4. Perspectiva de preço

Olhando para 2022, a maioria dos analistas espera que os formuladores de políticas da China continuem seu controle rigoroso sobre a produção de aço bruto pelo menos durante o primeiro trimestre, quando os Jogos Olímpicos de Inverno serão realizados em Pequim e o país se concentrará em manter a qualidade do ar em níveis mais altos e céu azul durante o evento. No entanto, se a China não relaxar sua posição contra a especulação imobiliária e a desalavancagem de desenvolvedores em 2022, a maioria dos analistas acredita que o investimento em infraestrutura será antecipado para sustentar o crescimento do PIB. Isso deve ser positivo para a demanda de aço em 2022, apoiando os preços do minério de ferro durante o ano.

No momento em que este relatório foi elaborado, o consenso de preços para os preços do minério de ferro em 62% Fe em 2022 dos analistas era de US \$ 112/t (tabela abaixo - preços em USD), com uma tendência de queda para a frente até que os preços atinjam o nível de longo prazo de cerca de US \$ 70/t. Além disso, acreditamos que a produção futura esperada, em relação às nossas reservas de minério de ferro, pode ser absorvida pelo mercado no longo prazo, dada a demanda esperada pelos analistas de mercado. A Figura 161 mostra o preço do minério de ferro para 62% fe.

Iron Ore Price Outlook for 62% Fe grade (\$/t)



Fonte: Relatórios de bancos publicados entre setembro e outubro de 2021

Figura 16-1 - Minério de ferro 62% preços (US\$/tonelada métrica seca)

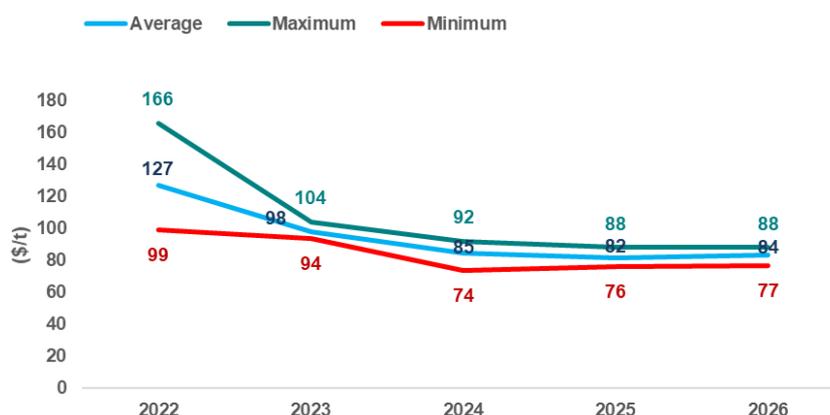
Legenda:

Iron Ore Price Outlook for 62%	Perspectiva de Preço de Minério de Ferro para teor de 62%
Average	Média
Maximum	Máximo
Minimum	Mínimo

O diferencial de preços entre o índice de 65% e os 62% depende de alguns fundamentos orientados pelo mercado. Além dos benefícios ambientais do uso de minérios de alto teor para produzir aço, uma maior parte desses minérios no alto forno aumenta a produtividade à medida que mais Fe é adicionado ao processo e menos combustível (coque) é necessário para reduzir o minério em ferro. Assim, durante períodos em que as usinas estão tentando aproveitar ao máximo seu processo (alcançar margens altas) ou quando os custos de coque aumentam, a demanda e, conseqüentemente, o diferencial de preço dos minérios de alta qualidade sobre teores médios aumentará. Nos últimos anos, evidências claras deste ponto foram a implementação dos cortes de inverno na China, onde a produção de aço foi restringida para reduzir as emissões. O corte na oferta de aço levou a preços mais altos do aço, seguidos por um aumento no diferencial de preços de 65%. Em 2021, as margens de aço mais altas e os altos preços do carvão de coque elevam o prêmio de 65% para altas históricas.

No momento em que este relatório foi elaborado, o consenso de preços para os preços do minério de ferro em 65% Fe em 2022 dos analistas era de US \$ 127/t (tabela abaixo - preços em USD), com uma tendência de queda para a frente até que os preços atinjam o nível de longo prazo de cerca de US \$ 84/t. Figura 162 mostra o preço do minério de ferro para 65% Fe.

Iron Ore Price Outlook for 65% Fe grade (\$/t)



Fonte: Relatórios de bancos publicados entre setembro e outubro de 2021

Figura 16 2 - Minério de ferro 65% preços (US\$/tonelada métrica seca).

16

Legenda:

Iron Ore Price Outlook for 62% Perspective de Preço de Minério de Ferro para teor de 62%

Average Média

Maximum Máximo

Minimum Mínimo

2

Como a tendência para 2022 tanto para as margens de aço quanto para os preços de carvão/coque permanece positiva, a maioria dos analistas de mercado prevê que os prêmios para materiais de alto teor permanecerão bem suportados.

O valor em uso (VIU) por ponto percentual adicional de Fe CFR China foi previsto, dividindo-se o preço apresentado na linha "Consenso/Média" da tabela 62% Fe CFR China pelo seu teor de Fe (62%). Essa metodologia é robusta ao comparar médias históricas. Além disso, existem vendas de minério no mercado usando essa metodologia para o ajuste de ferro. Os valores previstos estão na Tabela 16-1.

Tabela 16-1 - VIU por ponto percentual adicional de Fe (USD/tonelada métrica seca)

	2022	2023	2024	2025	LP
VIU por ponto percentual adicional de Fe	1,81	1,46	1,28	1,22	1,13

Apenas para fins de comparação e informação, a tabela abaixo mostra os preços de minério de ferro realizados nos últimos 5 anos ou Platts 62% Fe IODEX CFR China (Tabela 16-2).

Tabela 16-2 - Platts de minério de ferro para 62% Fe (USD/tonelada métrica seca)

	2017	2018	2019	2020	2021	Média
Platts de minério de ferro 62% Fe IODEX CFR China	71,3	69,5	93,4	108,9	159,5	100,5

16.2. Contratos

16.2.1. Operações do sistema norte TRS: contratos de logística/distribuição

Operamos a ferrovia EFC sob um contrato de concessão, que foi recentemente renovado e expirará em 2057. A ferrovia EFC liga nossas minas do Sistema Norte na região de Carajás, no Pará, ao terminal marítimo da Ponta da Madeira, em São Luís, no Estado do Maranhão.

Contamos com contratos de longo prazo de afretamento para garantir a capacidade de transporte e melhorar nossa capacidade de oferecer nossos produtos no mercado asiático a custos competitivos em uma base CFR. Para apoiar nossa estratégia comercial para nosso negócio de minério de ferro, temos acordos de longo prazo com dezessete portos na China, que também servem como centros de distribuição.

16.2.2. Operações do sistema norte TRS: logística – completo

Nossa produção de Serra Sul é transportada de trem até o porto através da ferrovia carajás ('EFC')." A ferrovia EFC liga nossas minas do Sistema Norte na região de Carajás, no Pará, ao terminal marítimo da Ponta da Madeira, em São Luís, no Estado do Maranhão. Operamos a ferrovia EFC sob um contrato de concessão, que foi recentemente renovado e expirará em 2057. A EFC se estende por 997 quilômetros das minas de Carajás até as instalações do complexo do terminal marítimo da Ponta da Madeira. Sua principal carga é o minério de ferro, transportado principalmente para nós. A VLI tem o direito de comprar a capacidade de transporte ferroviário em nossa ferrovia

EFC. Em 2021, a ferrovia EFC transportou 188.335 mil toneladas de minério de ferro. Em 2021, a EFC tinha uma frota de 298 locomotivas e 21.175 vagões, que eram operados pela Vale e terceiros.

Operamos portos e terminais marítimos principalmente para concluir a entrega de nossas pelotas de minério de ferro e minério de ferro para navios graneleiros que atendem o mercado marítimo. A produção da Serra Sul é exportada através do terminal marítimo de Ponta da Madeira. Nosso terminal marítimo de Ponta da Madeira está localizado no estado brasileiro do Maranhão. Pier I pode acomodar embarcações de até 420.000 DWT e tem uma taxa máxima de carregamento de 16.000 toneladas por hora. O Pier III, onde há dois berços e três navios, pode acomodar embarcações de até 210.000 DWT no cais sul e 180.000 DWT no cais norte (ou dois navios de 180.000 DWT simultaneamente), sujeitos às condições de maré, e tem uma taxa máxima de carga de 8.000 toneladas por hora em cada navio. O Pier IV (berço sul) é capaz de acomodar embarcações de até 420.000 DWT e há dois carregadores de navios que trabalham alternadamente com uma taxa máxima de carregamento de 16.000 toneladas por hora. Em 2018, a Vale recebeu a autorização aduaneira para as operações do Pier IV (cais norte). A carga embarcada através do terminal marítimo da Ponta da Madeira consiste na produção do sistema Norte de minério de ferro, pelotas e manganês. Em 2021, foram enviadas pelo terminal 182,9 milhões de toneladas de minério de ferro, pelotas e manganês. O terminal marítimo de Ponta da Madeira possui um pátio de armazenamento com capacidade estática de 7,2 milhões de toneladas.

Contamos com contratos de longo prazo de afretamento para garantir a capacidade de transporte e melhorar nossa capacidade de oferecer nossos produtos no mercado asiático a custos competitivos em uma base CFR. Para apoiar nossa estratégia comercial para o nosso negócio de minério de ferro, operamos dois centros de distribuição, um na Malásia e outro em Omã e temos acordos de longo prazo com dezessete portos na China, que também servem como centros de distribuição.

Em 2015, lançamos a BRBF, produto resultante da mistura de finos de Carajás, que contêm maior concentração de ferro e menor concentração de sílica no minério, com finos dos Sistemas Sul e Sudeste, que contêm menor concentração de ferro no minério. Em agosto de 2018, o Metal Bulletin lançou um novo índice, o índice Fe de baixa alumina de 62%, que se baseia no nosso BRBF. Para 2020, o índice Fe de baixa alumina de 62% foi negociado com um prêmio de US\$ 1,2 por dmt sobre o índice Fe de 62%. A mistura resultante oferece forte desempenho em qualquer tipo de operação de sinterização. É produzido em nosso Terminal Marítimo Teluk Rubiah na Malásia e nos dezessete centros de distribuição na China, o que reduz o tempo para chegar aos mercados asiáticos e aumenta nossa capilaridade de distribuição usando embarcações menores. Em 2019, anunciamos o lançamento do GF88, um novo produto para abastecer o crescente mercado de produção de pelotas na China, que consiste em finos de Carajás (COIJ) obtidas através de um processo de moagem, abrindo um novo mercado para nosso portfólio de produtos de alta qualidade.

17. Estudos ambientais, permissões e planos, negociações ou acordos com indivíduos ou grupos locais

O Complexo de Mineração Serra Norte, também conhecido como Complexo Minerador de Ferro Carajás, fica na cidade de Parauapebas, e é a maior cava de minério de ferro a céu aberto do mundo.

Existem diferentes áreas ambientais e protegidas localizadas nas proximidades do complexo Serra Norte, como as Florestas Nacionais de Tapirapé-Aquiri, Itacaiúnas e Carajás; Parque Nacional dos Campos Ferruginosos; Reserva Biológica Tapirapé; Terra Indígena de Xikrin do Rio Cateté; e Igarapé Gelado. A área total compreende aproximadamente 1,2 milhão de hectares, relativamente bem preservada, em contraste com as regiões antropizadas do entorno.

As restrições ambientais que afetam a Serra Norte são apresentadas a seguir:

Presença de unidades de conservação

Serra Norte faz parte da Floresta Nacional de Carajás, que faz parte de um grupo de unidades de conservação destinadas a proteger a biodiversidade, qualificada como área de extrema importância. Regionalmente, o conjunto dessas áreas protegidas inclui reservas florestais e outras unidades de conservação, denominadas áreas de uso especial, juntamente com o conjunto de terras indígenas. A Floresta Nacional de Carajás pertence ao grupo de áreas protegidas de "uso sustentável" que preveem usos múltiplos em seus limites, incluindo mineração.

Atualmente, estão em andamento discussões com o órgão gestor da unidade de conservação para alterar o zoneamento do Plano Nacional de Gestão Florestal de Carajás, o que permitirá o avanço em áreas atualmente consideradas restritas à mineração em N1/N2.

Cavidades naturais subterrâneas

Apoiadas pela legislação federal e instruções normativas específicas, estabelece que as cavidades devem ser classificadas de acordo com seu grau de relevância (Máximo, Alto, Médio e Baixo) e define os estudos necessários e as possibilidades de compensação em caso de impactos nas cavidades com grau de relevância Alto, Médio e Baixo.

As cavidades com um grau máximo de relevância não podem estar sujeitas a impactos negativos irreversíveis em torno de seu buffer de 250 m até que suas respectivas áreas de influência sejam validadas pelos órgãos de licenciamento da Agência correspondentes aos respectivos processos de licenciamento.

No âmbito dos estudos e licenças, a VALE vem obtendo autorizações específicas e individuais por cavidade para lavra controlada em áreas de influência inferiores a 250 metros (média de 150 m), onde os projetos são monitorados pela agência ambiental por meio de relatórios de monitoramento sobre as condições físicas e biológicas dos mesmos. A Vale também obteve êxito em pedidos de reclassificação de relevância de grau máximo para não máximo (Alto, Médio ou Baixo) e, conseqüentemente, tornou-se elegível para processos de compensação ambiental de acordo com a lei, recuperando assim as reservas bloqueadas.

Além disso, em relação à compensação de cavidades, para obter um equilíbrio de cavidades aptas a serem oferecidas como compensação, a Vale realiza campanhas para identificar cavidades em áreas sem interesses de mineração, buscando maior previsibilidade de suas necessidades e antecipando demandas.

17.1. Aspectos ambientais

O Complexo Serra Norte está localizado em Áreas Federais, dentro da Floresta Nacional de Carajás (Flona de Carajás), criada em 1998. De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 237/1997 e Lei Federal LC nº 140/2011, o licenciamento ambiental para

projetos de mineração está sob a responsabilidade do estado correspondente, exceto quando afetar diretamente mais de um estado, está localizado em terras indígenas, ou quando em terras federais.

Nesse sentido, o licenciamento ambiental de Serra Norte está sob o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), que analisa e aprova tecnicamente os projetos propostos para atividades de mineração nesse tipo de área.

No Brasil, o processo de licenciamento ambiental que permite a uma empresa operar dentro dos aspectos técnicos e jurídicos estabelecidos por lei tem três fases:

Licença Preliminar (LP): é solicitada ainda na fase de planejamento da atividade ou projeto, aprovando sua localização e concepção, atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos a serem atendidos na próxima fase de implementação do projeto;

Licença de Instalação (LI): autoriza a instalação do projeto ou atividade de acordo com as especificações dos planos, programas e projetos aprovados, incluindo restrições ambientais e medidas de controle;

Licença de Operação (LO): autoriza a operação do projeto, após verificação do efetivo cumprimento das condições estabelecidas nas duas licenças anteriores, com restrições ambientais e medidas de controle, mitigação e compensação determinadas para a operação.

As minas da Serra Norte, especificamente N4 e N5, obtiveram a licença de operação (LO) que lhes permite operar nas condições estabelecidas pelo órgão federal de licenciamento desde 2002. Atualmente, a licença de operação está sendo renovada no IBAMA quando o desempenho ambiental é avaliado para permitir a emissão da 10ª retificação.

As expansões ocorridas ao longo do tempo mantiveram em grande parte as condições estabelecidas na emissão inicial da licença, com parâmetros, pontos de monitoramento e alguns novos programas sendo ajustados para garantir a avaliação ambiental, o controle e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da operação. Tabela 17-1 mostra a lista de licenças na Serra Norte.

Tabela 17-1 - Permissão Ambiental na Serra Norte

Autorização/Permissão Ambiental	Agência ambiental	Descrição	Data de validade	Status
LI nº 1172/2017	IBAMA	Adequação das instalações da usina de beneficiamento	12/07/2021	Licença sob revalidação (Processo nº 02001.002197/2002-15) ⁽¹⁾
LI nº 1207/2018	IBAMA	Extensão da Esteira Transportadora do Sistema Móvel de Manuseio de Resíduos	20/03/2020	Licença sob revalidação (Processo nº 6407759/2019) ⁽¹⁾
LI nº 1307/2019	IBAMA	Projeto de Reprocessamento para Rejeitos da Barragem de Gelado	25/08/2023	Licença Válida
LI nº 1333/2019	IBAMA	Sistema de britagem na Mina do Morro I	20/12/2021	Licença Válida
LO nº 267/2002 (10ª Retificação)	IBAMA	Exploração de minério de ferro dos corpos N4 e N5 e extensões	27/03/2021	Licença sob revalidação (Processo nº 02001.002197/2002-15) ⁽¹⁾
LO nº 1570/2020	IBAMA	LT 230kV Carajás e Subestação Serra	27/03/2021	Licença sob revalidação (Processo nº 02001.011540/2020-96) ⁽¹⁾
LI nº 1142/2016	IBAMA	Estrada da Apinha	20/02/2023	Licença Válida
02001.002197/2002-15				

⁽¹⁾ De acordo com a legislação brasileira, podemos continuar operando durante o processo de renovação.

A empresa também preparou e apresentou os estudos ambientais e sociais necessários para a continuidade das operações. Esses processos estão em estágios diferentes, como mostrado na Tabela 17-2:

Tabela 17-2 - Processos para o complexo Serra Norte

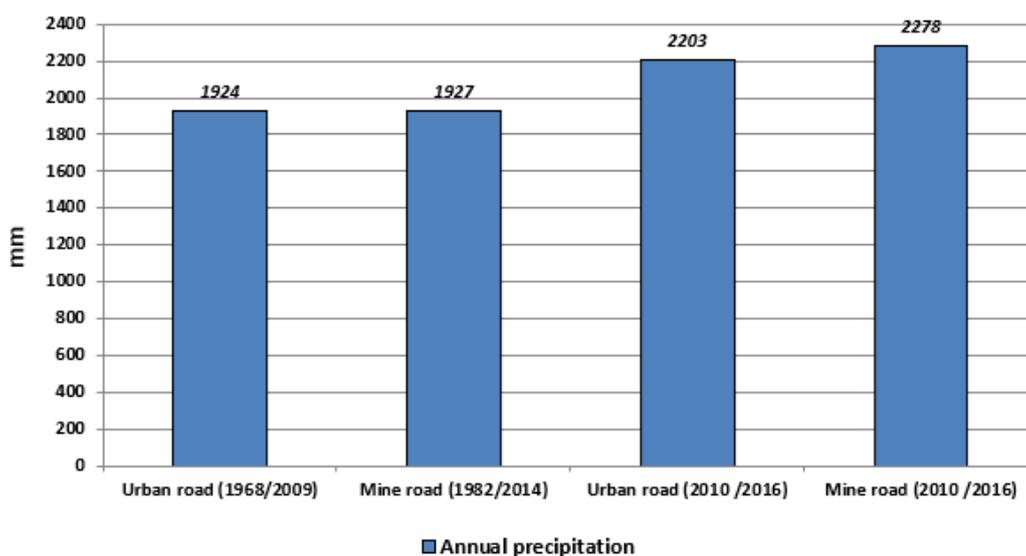
Projeto	Processo no Órgão Ambiental	Status	Estruturas	Processo	Previsão para Obter a Licença
				Formalização	
Mina N3	02001.003830/2015-07	LP	Mina N3	16/05/2018	2022
	IBAMA				
Mina N1 e N2	02001.111331/2017-46	LP	Mineração N1/N2	1 de fevereiro de 2020	2023
	IBAMA				

17.1.1. Clima

O clima atual na região amazônica e, conseqüentemente, na região da Serra Norte é uma combinação de vários fatores, sendo o mais importante a disponibilidade de energia solar, através do balanço energético. A localização entre a faixa 5° norte e 10° sul recebe fluxos constantes e intensos, desde que a temperatura do ar apresente uma pequena variação ao longo do ano. Assim, o clima típico é consolidado, com muitos dias de chuva de convecção. Portanto, a região de interesse possui uma característica climática típica das regiões equatoriais; entretanto, os aspectos microclimáticos devem ser considerados.

A região possui duas estações bem definidas: a estação chuvosa, de novembro a abril, quando chove 80% do total anual, e a estação seca, que vai de maio a outubro, com o trimestre mais seco (junho, julho e agosto) e médias mensais de 24 mm. A precipitação média anual para a região varia de 1.500 a 1.900 mm, e a temperatura média anual está entre 23,5 e 25,5°C, com a temperatura máxima da média mensal atingindo 32,5 e a mínima nunca é inferior a 18°C.

A umidade do ar na região permanece entre 70 e 85% em média. Nos meses mais secos, a umidade é ligeiramente reduzida, atingindo níveis mínimos em torno de 50% e média de cerca de 70%. Durante os meses chuvosos, de outubro a maio, a média máxima pode ultrapassar 95%. A Figura 17-1 mostra a precipitação anual da Serra Norte:



Estrada urbana (1968/2009)
Estrada da mina (1982/2014)
Estrada urbana (2010/2016)
Estrada da mina (2010/2016)

Urban road (1968/2009)
Mine road (1982/2014)
Urban road (2010/2016)
Mine road (2010/2016)

Precipitação anual

Annual precipitation

Figura 17-1 - Precipitação anual da Serra Norte

17.1.2. Hidrologia

A mina da Serra Norte no domínio da sub-bacia do Rio Parauapebas, um afluente do Rio Itacaiúnas que deságua no Rio Tocantins, na cidade de Marabá.

O rio Parauapebas nasce na Serra Arqueada através do rio Caracol e rio Onça. Ele flui na direção norte-sul, recebendo os seguintes afluentes: Córrego Goiaba, rio Sossego, rio Taboca, rio Jacaré e rio Gelado (também conhecido como Cigano ou Mombuca), na margem esquerda; e os rios Plaquê e Verde, o riacho Ilha do Coco e os rios Novo e Caracol, na margem direita.

17.1.3. Vegetação

Existem dois tipos principais de vegetação na área de Serra Norte, floresta e campos, também conhecidos na região como vegetação de canga.

Áreas de vegetação de canga ocorrem em afloramentos de ferro, geralmente caracterizados por espécies de ervas e arbustos. Os tufos florestais são pequenas áreas de floresta que surgem no meio da vegetação de canga. A área de vegetação florestal é onde predominam as árvores, juntamente com ervas, arbustos, palmeiras e trepadeiras.

17.2. Gerenciamento ambiental

Os principais programas de gestão ambiental são descritos abaixo.

17.2.1. Sistema de gestão ambiental

Por meio de um sistema de gestão ambiental, a Vale implementa planos e procedimentos para identificar não conformidades, desenvolver planos de correção e ações de melhoria contínua. O sistema de gestão visa prevenir e controlar potenciais impactos ambientais e sociais identificados nas avaliações de impacto submetidas às agências reguladoras.

Atualmente, no sistema Norte, as minas N4 e N5 são certificadas com ISO 14001:2015.

17.2.2. Remoção e armazenamento do solo superficial

O solo superficial de áreas suprimidas, formado por camadas com maior teor de matéria orgânica, é armazenado e utilizado no processo de reabilitação de áreas degradadas. Este material é rico em nutrientes e possui propágulos da vegetação nativa, importante para a recuperação de áreas alteradas ou degradadas.

17.2.3. Gerenciamento de efluentes líquidos

Os separadores de água-óleo são usados para tratar os efluentes gerados nas oficinas de manutenção e no reabastecimento de veículos. Os efluentes sanitários gerados nas áreas administrativas são tratados na Estação de Tratamento de Esgoto.

17.2.4. Sistema de drenagem

As áreas operacionais e as vias de acesso são equipadas com sistemas de drenagem para direcionar a água da chuva para as lagoas de decantação das bacias hidrográficas. Os sistemas de drenagem também são importantes para conduzir a água e evitar erosão. Esses sistemas são monitorados constantemente e ajustados tecnicamente quando necessário.

17.2.5. Gerenciamento de resíduos sólidos

Os resíduos sólidos gerados são segregados e acondicionados adequadamente, de acordo com suas características, até o destino.

17.2.6. Qualidade do ar

A emissão de material particulado é controlada por meio de umidificação de estradas não pavimentadas com caminhões-pipa, uso de aspersores fixos, definição de limites de velocidade de veículos, lavagem de estradas pavimentadas, manutenção de máquinas e equipamentos, revegetação de pilhas e áreas de mineração, e monitoramento ativo.

O monitoramento da qualidade do ar e meteorológica no local da mina é realizado por 03 estações automatizadas que geram continuamente dados através de analisadores e sensores específicos. Essas estações encontram-se no Centro Urbano de Carajás, na Mina, e na Barragem de Gelado. Essas estações monitoram os seguintes parâmetros: Partículas Totais Suspensas (PT) e Partículas Inaláveis (PI).

17.2.7. Monitoramento de ruído e vibração

Este monitoramento visa avaliar o ruído e a vibração, por meio de monitoramento sismográfico periódico, permitindo a comparação com os padrões definidos pela legislação atual.

No Complexo de Mineração de Carajás, esse monitoramento é realizado periodicamente por meio de uma rede de amostragem, em pontos distribuídos nos seguintes locais: mina e plantas, rodovia, floresta natural e barragens. As informações obtidas são armazenadas em um banco de dados e enviadas anualmente ao IBAMA em um relatório consolidado.

Como complemento a esse programa, a Vale vem desenvolvendo o Programa de Monitoramento de Bioindicadores para monitorar o impacto do ruído na fauna, com 15 pontos especificamente destinados a esse monitoramento.

17.2.8. Bioindicadores

Este monitoramento visa avaliar como o projeto afeta a dinâmica da fauna e da flora. A rede de monitoramento atende todo o Complexo de Mineração de Carajás (Serra Norte e Serra Sul).

17.2.9. Recursos hídricos

O programa de gestão da qualidade da água é responsável pelo monitoramento dos efluentes subterrâneos, da água potável e dos líquidos. Os resultados são consolidados em relatórios anuais e fornecidos às agências ambientais.

17.2.10. Supressão Vegetal

Este programa visa aplicar técnicas de manejo florestal voltadas para a segurança dos trabalhadores e o mínimo impacto na fauna e na flora.

17.2.11. Parque zoobotânico

Criado em 1985, mantido e administrado pela Vale, o Parque Zoobotânico é o lar exclusivo de espécies nativas de fauna e da flora amazônica. Localizado dentro da Floresta Nacional de Carajás, em uma Unidade de Conservação Federal, ocupa uma área de 30 hectares preservados, o que permite a livre circulação da fauna local. O espaço recebe cerca de 100.000 visitantes por ano.

17.2.12. Plano de recuperação de áreas degradadas

Este programa visa reabilitar as áreas morfologicamente alteradas por atividades de mineração, visando restaurar a funcionalidade do ecossistema.

17.2.13. Prevenção contra incêndios

A Vale trabalha em parceria com o Ibama e ICMBio para executar procedimentos de prevenção e combate a incêndios para proteger unidades de conservação em Carajás.

17.3. Requisitos sociais ou comunitários

A comunidade mais próxima da Operação Serra Norte é o município de Parauapebas, localizado a aproximadamente 30 km ao sul, com população de aproximadamente 210.000 habitantes. O valor investido pela Vale na região em programas sociais em 2020 foi de cerca de 12 milhões de dólares. Esta seção descreve as principais ações sociais e resultados relacionados à operação.

17.3.1. Programa de educação ambiental

Este programa contribuir para aumentar a conscientização crítica dos funcionários (VALE e terceiros) e das comunidades sobre responsabilidade ambiental.

17.3.2. Programa de recrutamento e treinamento da força de trabalho

Esse programa pretende contratar o maior número possível de funcionários residentes no município onde o projeto opera. Portanto, esse programa visa qualificar a força de trabalho local por meio da profissionalização de cursos técnicos.

17.3.3. Programa de saúde

Por meio de parcerias com o governo, a Vale realiza investimentos nas áreas de infraestrutura, educação e saúde, envolvendo construção e reforma de postos de saúde, doação de equipamentos hospitalares e ambulâncias.

17.4. Fechamento da mina e uso futuro

As ações de fechamento de um projeto de mineração devem considerar o quadro regulamentar e legal, as normas ambientais e sociais e as boas práticas, as questões econômicas e a promoção do uso futuro do território, de acordo com a sua vocação identificada através de um processo de escuta ativa.

Para garantir o sucesso dessas ações em todas as minas da empresa, a Vale estabelece um plano integrado de fechamento de mina, realizado por equipes multidisciplinares em um contexto de governança efetiva. Assim, é possível atender às demandas técnicas de fechamento e, ao mesmo tempo, contribuir para o desenvolvimento sustentável de territórios minerados, com engajamento social e valor compartilhado.

Para orientar a estratégia e as ações, a empresa possui regras e procedimentos internos, com destaque para o Guia de Fechamento de Mina e o procedimento para a provisão financeira para desmobilização de ativos, entre outros. Também participa do grupo de discussão do Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM) sobre o Fechamento de Mina. Com o objetivo de fortalecer o tema no Brasil, a Vale também colaborou na elaboração do IBRAM - Guia de Planejamento de Fechamento de Mina do Instituto Brasileiro de Mineração.

A questão do fechamento da mina ganhou uma posição de destaque na Vale por meio de um sólido modelo de governança sólida que incorpora uma visão em camadas das linhas de defesa no gerenciamento de riscos, segurança e eficiência durante todo o ciclo de vida do projeto.

Sua prioridade é trabalhar para fechar minas e implementar uso futuro com conceitos de valor compartilhado com a sociedade, além de trabalhar para estabilizar as estruturas geotécnicas existentes, garantindo a segurança a longo prazo.

17.4.1. Regulamentos legais, normas técnicas, terminologia e conceitos aplicados ao fechamento

Na legislação brasileira, o Fechamento de Mina vem passando por mudanças, enfatizando regulamentos que direcionam a indústria a operar de forma mais sustentável, com equilíbrio ambiental, social e econômico.

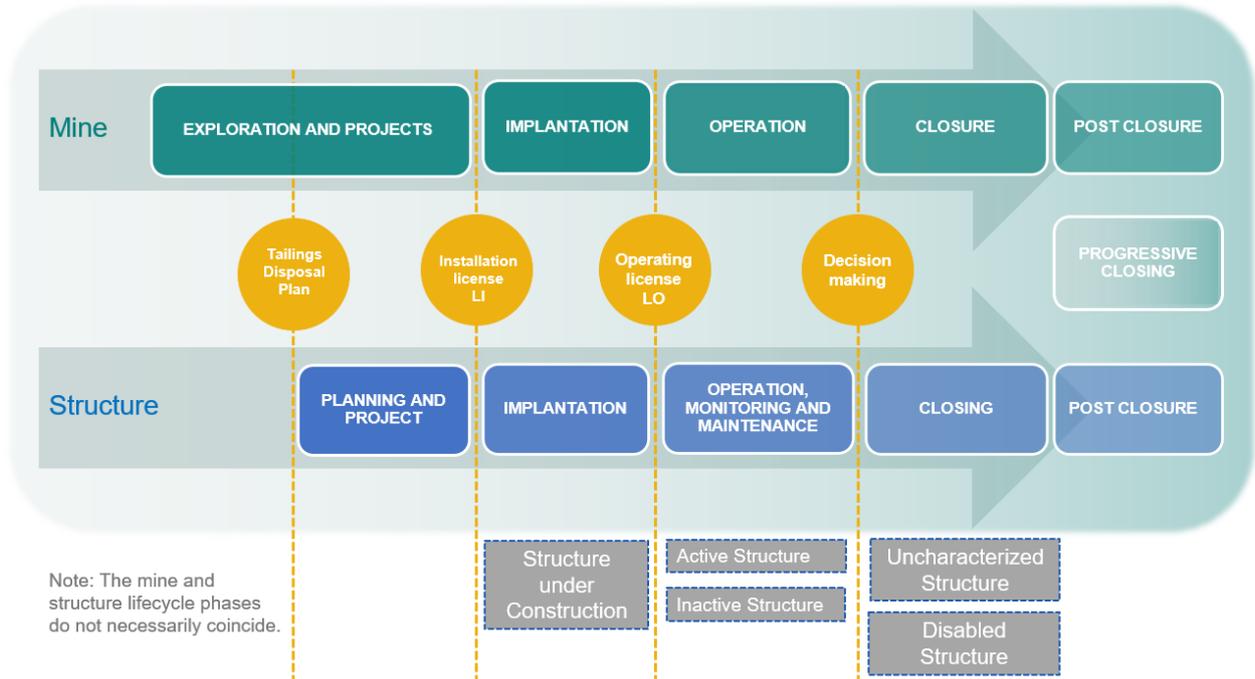
O regime regulatório que atende a Mineração reflete a evolução normativa da lei de mineração e a disposição institucional construído abrange os três níveis da Federação (União, Estados e Municípios) e promove interfaces entre os diferentes campos da Lei, principalmente a Lei Ambiental, que tem o maior impacto na Atividade Mineral, refletindo significativamente sobre o tema de Fechamento de Mina.

Atualmente, o conceito de "fechamento de mina" ainda está na consolidação do processo na legislação e regulamentação brasileira.

Os termos e os conceitos aplicados ao fechamento de mina são muito diversos. Seguimos as melhores recomendações técnicas nesse sentido, contidas na legislação brasileira, normas da ABNT e trazidas pelas diretrizes do Instituto Brasileiro de Mineração.

Guia IBRAM sobre Boas Práticas de Gestão para Estruturas de Descarte de Rejeitos e Barragens fornece uma nomenclatura dos termos associados ao processo de fechamento das atividades de

estruturas geotécnicas para retenção de rejeitos de mineração, especificamente barragens (Figura 17-2). Este guia está alinhado com as diretrizes estabelecidas na legislação mineral.



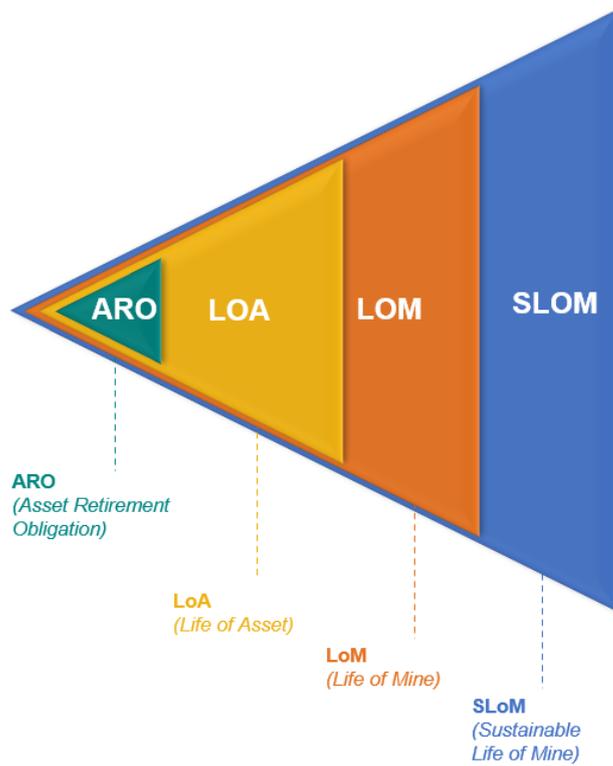
Legenda:

Mina	EXPLORAÇÃO E PROJETOS	IMPLANTAÇÃO	OPERAÇÃO	ENCERRAMENTO	PÓS-FECHAMENTO
	Plano de Disposição de Rejeitos	Licença de instalação LI	Licença de operação LO	Tomada de decisão	FECHAMENTO PROGRESSIVO
Estrutura	PLANEJAMENTO E PROJETO	IMPLANTAÇÃO	OPERAÇÃO, MONITORAMENTO E MANUTENÇÃO	FECHAMENTO	PÓS-FECHAMENTO
Nota: As fases do ciclo de vida da mina e da estrutura não coincidem necessariamente.		Estrutura em Construção	Estrutura Ativa	Estrutura Não Caracterizada	
			Estrutura Inativa	Estrutura Desativada	

Mine	EXPLORATION AND PROJECTS	IMPLANTATION	OPERATION	CLOSURE	POST CLOSURE
	Tailings Disposal Plan	Installation license LI	Operating license LO	Decision making	PROGRESSIVE CLOSING
Structure	PLANNING AND PROJECT	IMPLANTATION	OPERATION, MONITORING AND MAINTENANCE	CLOSING	POST CLOSURE
Note: The mine and structure lifecycle phases do not necessarily coincide.		Structure under Construction	Active Structure	Uncharacterized Structure	
			Inactive Structure	Disabled Structure	

Figura 17-2 - Conceitualização dos termos aplicáveis ao fechamento de mina na Vale

Os procedimentos de fechamento de ativos da Vale e estimativas de custos futuros serão conceitualmente alinhados com as melhores práticas e recomendações do Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM) por meio das visões ARO, LoA, LoM and SLoMARO, LoA, LoM e SLoM (Figura 17-3).



ARO
(Obrigação de Retirada de Ativos)

LoA
(Vida Útil do Ativo)

LoM
(Vida Útil da Mina)

SLoM
(Vida Sustentável da Mina)

ARO
(Asset Retirement Obligation)

LoA
(Life of Asset)

LoM
(Life of Mine)

SLoM
(Sustainable Life of Mine)

Figura 17-3 – Gráfico das visões ARO, LoA, LoM and SLoM

O desenvolvimento de um processo de fechamento progressivo é realizado por meio do planejamento de LoA, com foco nas ações de fechamento ao longo de todo o ciclo de vida útil de um ativo, que compreende as fases de concepção, implementação, operação, fechamento e pós-fechamento.

Para estabelecer os conceitos e padronizar as diretrizes para orientar os processos relacionados ao fechamento progressivo de ativos e padronizar as funções e responsabilidades dos gerentes vinculados à fase de fechamento de ativos, um procedimento de gestão denominado “Fechamento Progressivo de Ferrosos”, que apresenta a forma como o ativo é administrado tanto do ponto de vista da avaliação de sua condição no processo de fechamento da mina quanto do fornecimento de condições financeiras para que as ações necessárias sejam realizadas.

Para a desativação do Complexo Serra Norte, foram consideradas suas principais estruturas: cavas, pilhas de estéril, diques de contenção, bacias e depósitos, instalações industriais e infraestrutura de apoio.

As atividades previstas para a descaracterização ou desativação dos ativos do Complexo Serra Norte na fase de fechamento estão descritas abaixo, de acordo com suas características específicas, para adequá-los às normas de segurança exigidas e ao cenário de fechamento previsto para a área.

17.4.2. Cavas

As atividades previstas para o fechamento das cavas do Complexo Serra Norte estão resumidas na Tabela 17-3.

Tabela 17-3 - Atividades de fechamento - Cavas

Tipologia	Estrutura	Atividades
Cava	N1, N2, N3, N4E, N4WN, N4WS, N5EN, N5S, N5W, Morro I. Cavas 1, 2 e 3. Cava Granito	- Levantamento topográfico; - Ajustes de talude localizados; - Ajuste de drenagem superficial localizada; - Ajuste final do sistema de monitoramento geotécnico; - Ajuste final do sistema de monitoramento de nível de água; - Revegetação de talude localizada; - Implementação da barreira de segurança.
	N5E, N5W, N4EN e Cava 1	Disposição de estéril

17.4.3. Pilha de resíduos

As atividades previstas para desativá-la são apresentadas brevemente na Tabela 17-4.

Tabela 17-4 - Atividades de fechamento - Pilha de Resíduos

Tipologia	Estrutura	Atividades
Depósito de Resíduos	PDE Oeste, PDE Sul III, PDE Sul IV, PDE Noroeste I, PDE Noroeste II, PDE Sudoeste N4W, PDE Norte I, PDE Leste I, PDE Jacaré, PDE Sudeste N5, PDE N5S, PDE N5E, PDE N5W, PDE N1 e PDE N2.	- Levantamento topográfico; - Ajuste final do sistema de monitoramento geotécnico; - Ajustes de talude localizados; - Ajuste final do sistema de drenagem superficial e de correia; - Reforço de vegetação de talude e berma.
	PDE 1, PDE 2 e PDE 3.	- Ajustes de talude localizados; - Ajuste final do sistema de drenagem superficial e de correia; - Reforço de vegetação de talude e berma.

17.4.4. Sistema de Contenção de Sedimentos

As atividades previstas para o fechamento dos diques de contenção nas Minas de Serra Norte são apresentadas brevemente na Tabela 17-5.

Tabela 17-5 - Atividades de fechamento - Sistema de Contenção de Sedimentos

Tipologia	Estrutura	Atividades
Barragem e Depósitos	Barragem de Gelado, Barragem de Geladinho, Dique PDE Noroeste II, Barragem Estéril Sul, Dique Granito, Dique PDE Jacaré e 2 Barragens Pera	- Ajuste final do sistema de monitoramento geotécnico; - Reforço de vegetação de talude e berma; - Proteção superficial do ajuste final do aterro; - Ajuste de drenagem superficial localizada; - Ajuste final do vertedouro; - Revegetação; - Implementação da barreira de segurança.
	Barragem Kalunga, Barragem Azul, Barragem PDE2	- Ajuste final do sistema de monitoramento geotécnico; - Ajuste final do vertedouro; - Revegetação.

17.4.5. Instalações Industriais e Infraestrutura de Apoio

As atividades previstas para o fechamento são apresentadas brevemente na Tabela 17-6.

Tabela 17-6 - Atividades de fechamento – instalações industriais e infraestrutura de apoio

Tipologia	Estrutura	Atividades
Instalações Industriais e Estrutura	Escritório, almoxarifado, rodovia Pera, instalações, posto de gasolina	- Levantamento de áreas com potencial contaminação; - Desativação dos Sistemas e Desmontagem de Estruturas; - Ajustes finais do sistema de drenagem; - Subsolação; - Revegetação.

17.4.6. Controle ambiental

A condição esperada para o Complexo Serra Norte no final da operação é mostrada na Figura 17-4 e Figura 17-5, destacando as principais estruturas e aquelas com potencial de uso futuro na área.

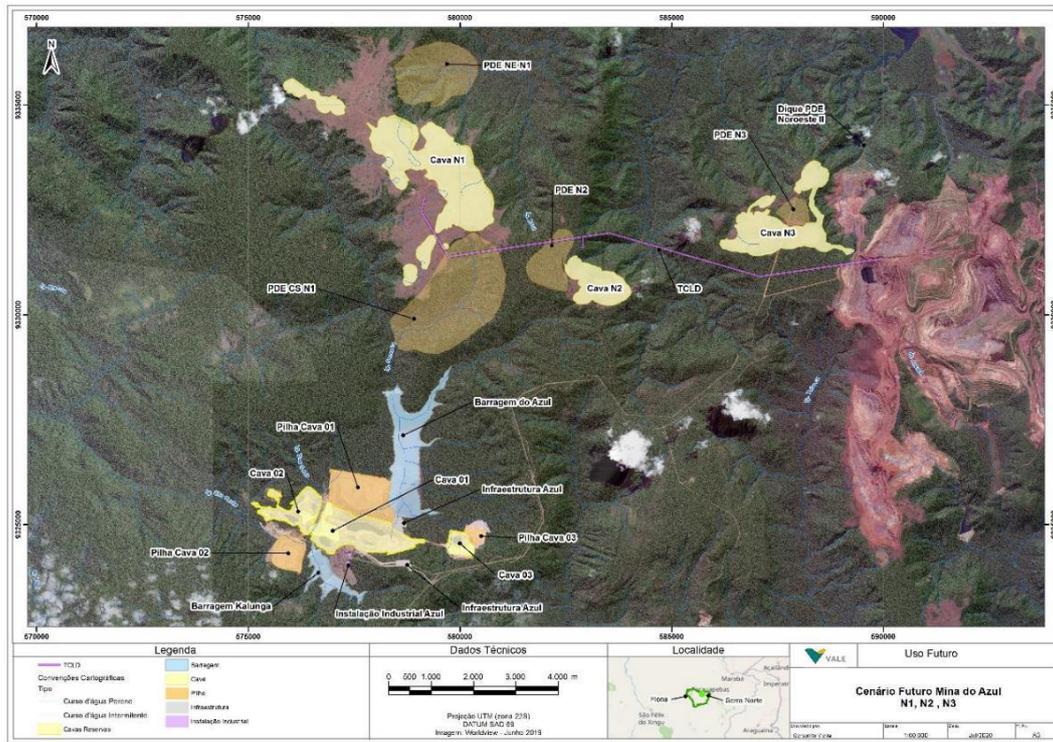


Figura 17-4 - Condição no final da operação - Minas Azul, N1, N2 e N3

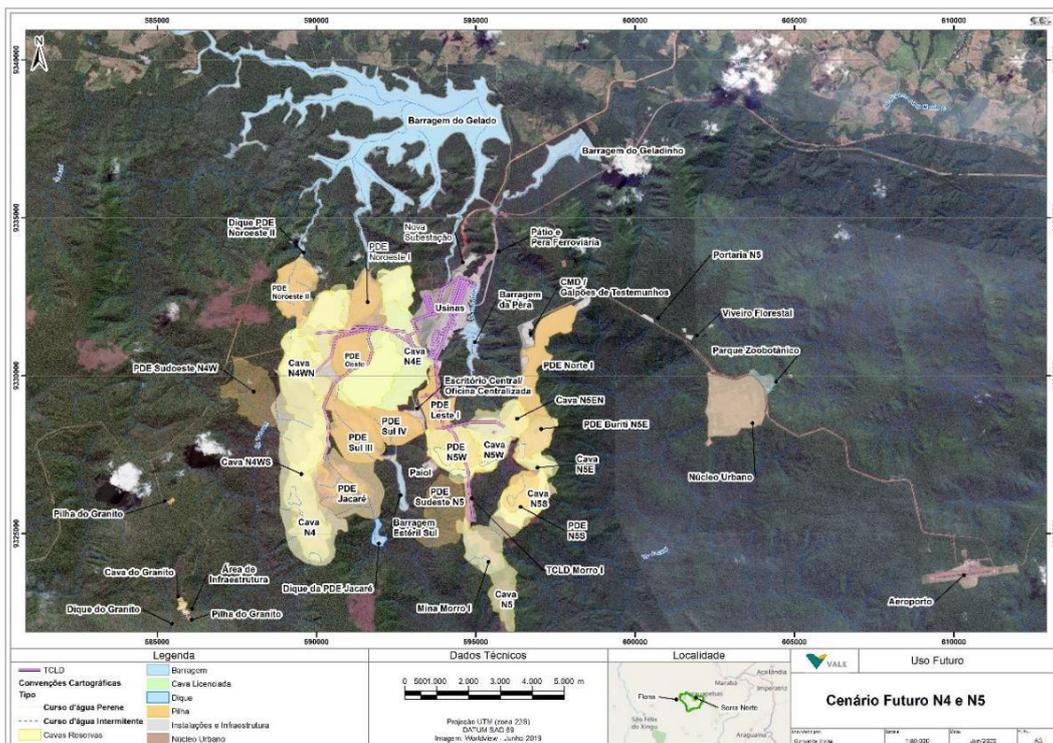


Figura 17-5 - Condição no final da operação em N4 e N5.

17.4.7. Monitoramento e manutenção

Como parte do plano de fechamento do Complexo Serra Norte, deve ser considerada a necessidade de monitoramento geotécnico e ambiental e a manutenção de áreas no estágio pós-fechamento. A Tabela 17-7 resume as principais atividades propostas para medir a eficiência das ações de fechamento para todos os ativos e para a área em geral.

Tabela 17-7 - Monitoramento e Manutenção Pós-Fechamento.

Atividades	Pontos de atenção
Monitoramento e Manutenção Pós-Fechamento	- Desenvolvimento de revegetação. - Estabilidade geotécnica; - Qualidade da água superficial e subterrânea.

17.4.8. Proposta de uso futuro

Com exceção das Barragens de Gelado e Geladinho, que estão parcialmente localizadas na EPA de Gelado, todos os ativos do Complexo Serra Norte estão localizados na área da Floresta Nacional de Carajás (FLONA de Carajás), uma unidade de conservação integral, cuja gestão é de responsabilidade do Instituto Chico Mendes - ICMBio.

Os objetivos fundamentais das Unidades de Conservação (UCs) são a proteção e a conservação da diversidade biológica e o desenvolvimento sustentável com base nos recursos naturais, bem como a partilha justa e equitativa dos benefícios gerados por eles. Portanto, o estabelecimento dessas unidades no território brasileiro visa manter os recursos naturais a longo prazo.

De acordo com a Lei nº 9.605/2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), PA deve ter um Plano de Gestão, que deve incluir medidas que, além de garantir a preservação ambiental, também tenham como objetivo promover a unidade de conservação da vida econômica e social das comunidades vizinhas. A mesma lei também apresenta o objetivo básico de uma Floresta Nacional, como "o uso sustentável múltiplo dos recursos florestais e pesquisa científica, com ênfase nos métodos de exploração sustentável das florestas nativas".

Com o objetivo de conciliar esses objetivos e cumprir a legislação relevante, em 2003, a Vale elaborou um Plano de Gestão para a Floresta Nacional de Carajás, baseado em estudos de fatores abióticos, bióticos e antrópicos, juntamente com o IBAMA, zoneamento conceituado para a área de FLONACA e vários programas de gestão e desenvolvimento, que são estruturados em cinco linhas básicas: Pesquisa e Desenvolvimento, Uso Público, Proteção, Produção e Gestão

Com base nos dados coletados durante a elaboração deste relatório e considerando as diferentes variáveis envolvidas, principalmente relacionadas ao Plano de Gestão de FLONA de Carajás, os aspectos relevantes para o estabelecimento de diretrizes sobre habilidades foram identificados no território das Minas de Serra Norte para uso futuro da área:

- Pesquisa e Desenvolvimento: Dada a importância da Floresta Amazônica, tanto nacional como internacional, além de FLONA de Carajás, com aproximadamente 400.000 hectares, é notável o interesse provável de várias universidades e centros de pesquisa em desenvolvimento, ou continuidade de projetos e estudos dentro da área de preservação. O Plano de Gestão, que descreve os possíveis usos futuros a serem implementados na Floresta Nacional de Carajás, apresenta o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento, que visa formar um banco de dados sobre os mais diversos aspectos da flora, fauna, e populações humanas e conhecimento local sobre os recursos naturais na Floresta Nacional de Carajás. A viabilidade do programa está associada ao trabalho conjunto com Universidades e Instituições de Pesquisa.

Nesse cenário, portanto, avalia-se a utilização de estruturas remanescentes nas áreas administrativas e operacionais das Minas de Serra Norte para alocar a base de apoio para pesquisadores, acomodação, equipamentos e laboratórios das unidades de pesquisa;

- Qualificação e Conservação da Biodiversidade: Visando tanto a continuidade da preservação da Floresta Nacional de Carajás quanto o desenvolvimento de atividades que

gerem riqueza para a região, o Plano de Gestão vê a necessidade de incentivar o treinamento e o treinamento profissional para a população local, com o objetivo de preparar a comunidade circundante e incentivar sua participação, para a implementação e desenvolvimento do plano.

Assim, as estruturas remanescentes nas áreas administrativas das Minas da Serra Norte também poderiam ser utilizadas para o aprendizado e desenvolvimento de habilidades, por meio de cursos de qualificação e treinamento;

- **Diversificação do Agroextrativismo Vegetal:** O Agroextrativismo integra a tradição extrativa e a produção agrícola familiar, ambas em uma relação sustentável com a floresta. Essas práticas vêm melhorando e ganhando espaço no universo produtivo amazônico por meio de ações relacionadas à agroecologia. A diversificação do uso agroextrativista dos recursos vegetais da FLONA de Carajás é um uso futuro das Minas de Serra Norte que complementam as propostas do Plano de Gestão da Floresta Nacional de Carajás (STCP, 2003). O principal objetivo seria contribuir para a promoção da produção sustentável, através da articulação entre organização comunitária e desenvolvimento tecnológico, de forma a garantir a autonomia econômica e financeira da FLONA de Carajás. Como contribuição para as linhas de ação propostas para FLONA de Carajás, sugere-se o desenvolvimento do agroextrativismo relacionado à Arte Étnica. A produção artesanal agroextrativista pode combinar inovação e tradição étnica, atingindo campos de mercado valorizados no Brasil e no mundo inteiro. Os elementos da floresta atraíram a atenção dos designers, conquistando o mundo da moda e da decoração. A tradição cultural e o fascínio pela biodiversidade brasileira, juntamente com a inovação tecnológica, podem agregar valor aos produtos do agroextrativismo vegetal;
- **Turismo Ecológico e Histórico:** A atração turística da região é baseada na grande beleza da paisagem local (florestas preservadas, montanhas, cachoeiras, monumentos naturais), cuja peculiaridade tem promovido o uso do turismo ecológico. Existe uma parceria entre o Instituto Chico Mendes (ICMBio) e a Cooperativa de Ecoturismo de Carajás (Cooperture), que visa facilitar a visitação pública da Floresta Nacional de Carajás, desde 2013. Os membros das cooperativas realizam atividades relacionadas ao ecoturismo na FLONA e em atrações em seus arredores. Como exemplo de conservação do patrimônio industrial de mineração em outros países e outras iniciativas semelhantes no Brasil, e o fato da Serra Norte ser o maior complexo de produção de minério de ferro do mundo, associou um interesse histórico e turístico especial às estruturas e processos e às demais instalações das Minas de Serra Norte.

17.4.9. Provisão financeira

O fechamento das atividades nas minas de minério de ferro de Serra Norte está previsto no projeto a ser realizado em 2037 e para as minas de manganês em 2027, com fechamento progressivo considerado, com ações de descomissionamento e desativação iniciando na fase operacional. A descrição das ações previstas para o fechamento é apresentada na Tabela 17-8, que se refere à provisão de recursos financeiros para a desmobilização de ativos utilizando o modelo ARO para 2021.

Tabela 17-8 - Provisão de recursos financeiros para a desmobilização de ativos utilizando o modelo ARO para 2021

Ativo	Total (US\$ M)
Cava	68.75
Pilhas de Estéril	67.85
Barragens and <i>Sumps</i>	99.90
Instalações Industriais	114.33
Outras Estruturas	33.89
Total	384.72

18. Custos operacionais e de capital

O PQ da Vale analisou os custos operacionais e de capital necessários para a lavra e o processamento de Reservas Minerais na Serra Norte. Serra Norte é uma mina em operação e as estimativas de custos operacionais e de capital foram elaboradas com base no desempenho operacional recente e no orçamento operacional atual para 2021. Todos os custos nesta seção são expressos em dólares americanos.

Em ambos os casos, as estimativas de custos operacionais e de capital são baseadas em estimativas recentes e custos reais e estão pelo menos em um nível de confiança de pré-viabilidade, com nível de acurácia de $\pm 25\%$ e uma faixa de contingência não superior a 15%.

O único objetivo dos valores apresentados é demonstrar a viabilidade econômica da reserva mineral, portanto, pode diferir de outras informações divulgadas pela Vale e não deve ser considerada como *guidance*.

18.1. Custos de capital

Os custos totais de capital para a vida útil de Serra Norte são mostrados na Tabela 18-1. Os custos de capital estão relacionados a novos projetos para manter ou aumentar a produção. Os custos de capital de investimento corrente estão relacionados a manter a taxa de produção atual e incluir a substituição de equipamentos de mina, avanços das cavas, um novo depósito de estéril, substituição de equipamentos e instrumentação da planta. Além disso, avaliações econômicas das reservas consideram projetos de capital que visam manter e/ou aumentar a capacidade produtiva. A estimativa geral de custo de capital para LOM ou período de avaliação é de USD 6.202 milhões, conforme mostrado na Tabela 18-1.

Tipo de Custo de Capital	Unit	Value
Investimento Corrente	US\$ M	5,026
Não-rotineiro	US\$ M	1,126
Mina e planta	US\$ M	794
Pilha de estéril e rejeito	US\$ M	332
Rotina	US\$ M	3,900
Projetos de Capital	US\$ M	1,176
Mina e planta	US\$ M	119
Logística e Outros	US\$ M	1,056
TOTAL	US\$ M	6,202

Tabela 18-1 - Estimativa de Custo de Capital de LOM
Nota: números foram arredondados

18.2. Custos operacionais

Despesas e custo operacional unitário médio de LOM:

- Mina e planta: 11,0 USD/tonelada de produto
- Logística e Distribuição: 19,3 USD/tonelada de produto
- Royalties: 2,5 USD/tonelada de produto
- Despesas de vendas, P&D, outros: 0,1 USD/tonelada de produto
- Total de despesas e custos operacionais unitários médios: 33,0 USD/tonelada de produto

A estimativa de custos e despesas gerais para LOM ou período de avaliação é de USD 51.872 milhões, conforme mostrado na Tabela 18-2.

Tabela 18-2 - Despesas e Custos Operacionais

Tipo de custos e despesas	Unidade	Valor
Mina e planta	USD M	17.264
Logística e Distribuição	USD M	30.378
Royalties	USD M	3.995
Despesas de vendas, P&D, outros	USD M	232
TOTAL de custos e despesas	USD M	51.872

Nota: números foram arredondados

O custo operacional médio é baseado em uma vida útil de 17 anos da mina de 2022 a 2038. Os elementos de custo operacional, incluindo mão de obra, consumíveis, suprimentos, custos de venda, escritórios comerciais, pesquisa e desenvolvimento operacional de manutenção, e foram baseados em dados do orçamento de 2021 da Vale.

18.2.1. Força de trabalho

A composição da força de trabalho e lista das principais contratadas para toda a operação de Serra Norte são apresentadas na Tabela 18-3 e Tabela 18-4, respectivamente. As principais contratadas da Serra Norte estão relacionadas à mineração, manutenção da planta e limpeza.

Tabela 18-3 - Força de trabalho da Vale

Serra Norte	Total
Mina	3.671
Planta	2.284
Outros	809
Total	6.764

Tabela 18-4 – Força de trabalho da contratada

Serra Norte (Contratadas)	Total
Mina	695
Planta	665
Outros	3.275
Total	4.635

19. Análise econômica

19.1. Cuidado com informações prospectivas

O objetivo da avaliação econômica apresentada neste capítulo é demonstrar a viabilidade econômica da reserva mineral, portanto, as taxas de produção, eficiências operacionais, custos e despesas, impostos e outras informações apresentadas podem diferir de outras informações que publicamos e não devem ser consideradas como *guidance*. Observe que nossa produção planejada pode variar devido à exploração mineral contínua e estudos técnicos para adicionar novas reservas minerais.

19.2. Critérios econômicos

A análise econômica neste Resumo do Relatório Técnico é baseada nas Reservas Minerais, premissas econômicas e os custos de capital e operacionais conforme apresentado na Seção 18 deste Resumo do Relatório Técnico.

19.2.1. Físicos

- Toneladas de minério lavradas: 1.590 Mt (vida útil da mina de 17 anos de 2022 a 2038);
- Total de minério processado: 1.590 Mt (vida útil da mina de 17 anos de 2022 a 2038);
- Vida útil da mina: 17 anos (entre 2022 e 2038);
- Teor de minério: 65,78% Fe;
- Recuperação média - LOM: 98,9%;
- Minério de Ferro recuperado: 1.573 Mt (vida útil da mina de 17 anos de 2022 a 2038).

19.2.2. Receita

O preço das commodities foi discutido no Capítulo 16.

Os custos médios logísticos considerados para este modelo são: 19,3 USD/ton, cerca de 70% do total de vendas durante a vida útil da mina de Serra Norte considerada como mercado externo e modelo CFR (custo e frete).

Os 30% restantes do volume de produção são entregues ao mercado interno ou primeiramente transferidos para nossas próprias unidades de pelotização e/ou vendidos ao mercado externo em uma base FOB (Livre a Bordo) e, apesar de não ter os custos de logística marítima associados, a receita líquida neste caso é menor, uma vez que os descontos são aplicáveis, pois os preços de referência são CFR China.

Para apoiar a estratégia comercial de minério de ferro da VALE, a empresa opera dois centros de mistura e distribuição, um localizado na Malásia e outro em Omã. A VALE também possui contratos de longo prazo com portos na China, que também servem como centros de distribuição.

O minério da Serra Norte é vendido como IOCJ (Minério de Ferro de Carajás), um produto premium com preços baseados no produto 65% Fe e como insumo para a mistura BRBF.

19.2.3. Custos Operacionais

- Despesas e custo operacional unitário médio de LOM:
- Mina e planta: 11,0 USD/tonelada de produto
- Logística e Distribuição: 19,3 USD/tonelada de produto
- Royalties: 2,5 USD/tonelada de produto
- Despesas de vendas, P&D, outros: 0,1 USD/tonelada de produto

- Total de despesas e custos operacionais unitários médios: 33,0 USD/tonelada de produto
- A estimativa de custos e despesas gerais para LOM ou período de avaliação: US\$ 51.872 milhões.

Os custos de mina e planta incluem lavra, processamento, armazenamento e transporte do minério para os pontos de carregamento. Custos de logística e distribuição incluem ferrovias, portos, frete marítimo e centros de distribuição.

19.2.4. Custos de Capital

- Estimativa geral de custo de capital para LOM ou período de avaliação: US\$ 6.202 milhões
- Capital de investimento corrente total: US\$ 5.026 milhões
- CAPEX de projetos de capital: US\$ 1.176 milhões

19.2.5. Principal Tributação e Royalties

- Taxa de royalty CFEM: 3,5 %
- Taxa do imposto de renda com benefício fiscal SUDAM: 15,25 % (2022 – 2024)
- Alíquota do imposto de renda: 34% (2025 – 2038)

19.3. Resultados da análise econômica

19.3.1. Introdução

A VALE elaborou o modelo de fluxo de caixa pós-imposto LOM da Operação Serra Norte para confirmar a economia do plano de LOM. A análise econômica é baseada em 100% do financiamento de capital e é reportado com base em 100% de propriedade do projeto.

O fluxo de caixa da reserva mineral para a Serra Norte é utilizado apenas para confirmar a viabilidade econômica. O fluxo de caixa anual é apresentado a seguir, com as entradas apresentadas como médias agrupadas para os primeiros 2 anos, seguidos por 3 anos e, posteriormente, grupos de 5 anos para o Plano de Vida da Mina.

O resumo do fluxo de caixa é apresentado na Tabela 19-1 e Figura 19-1. A moeda usada para documentar o fluxo de caixa é de USD e a análise econômica do caso base assume preços constantes sem ajustes inflacionários.

Fluxo de Caixa (somente reservas)	Unid.	2022-23	2024-26	2027-31	2032-36	2037-41	2042-46	2047-51
Minério de ferro recuperado	Mt	102	100	101	93	20	0	0
Receitas Totais	M US\$	9.739	7.134	6.941	6.472	1.356	0	0
Custos operacionais, despesas, royalties e custos de fechamento	M US\$	(3.435)	(3.307)	(3.310)	(3.074)	(632)	(42)	(42)
Imposto de renda e variações no capital de giro	M US\$	(820)	(898)	(1.112)	(1.001)	(130)	0	0
CapEx Total	M US\$	(469)	(752)	(303)	(246)	(53)	0	0

Tabela 19-1 – Tabela com os resultados do Fluxo de Caixa ⁽¹⁾

⁽¹⁾ O projeto da barragem Gelado não está considerada na análise econômica. O projeto Gelado não é classificado como recurso mineral nem como reserva mineral.

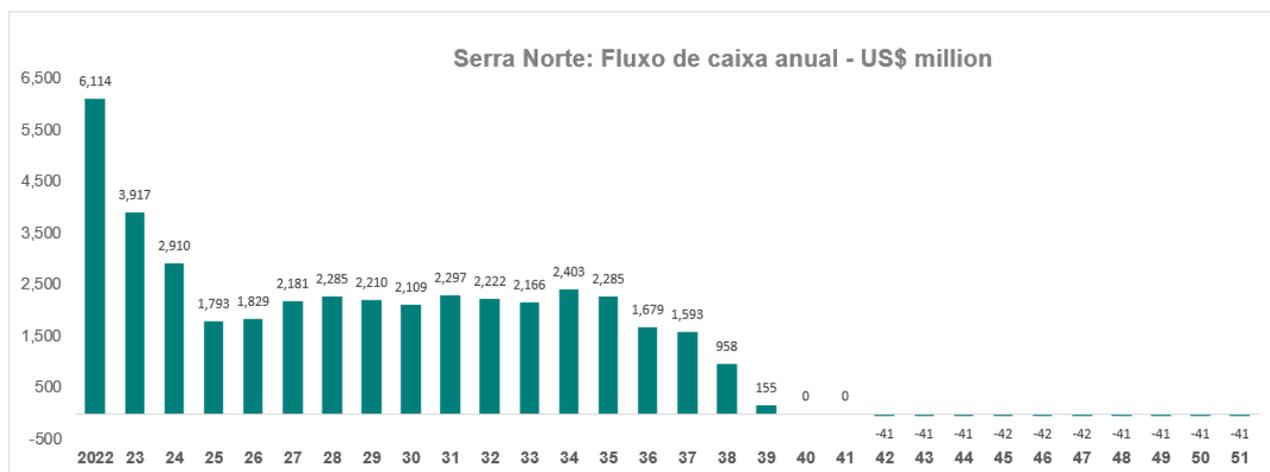


Figure 19-1 – Resultado gráfico do Fluxo de Caixa

19.3.2. Análise do fluxo de caixa

O modelo de avaliação econômica das reservas considerou o método de fluxo de caixa descontado e levou em conta as tonelagens e teores anuais processados. A recuperação do processo associado, preços de metal, custos operacionais, custos logísticos, royalties e gastos de capital também foram considerados. A análise econômica confirmou que a Serra Norte é economicamente viável. O VPL pós-imposto com taxa de desconto de 7,5% e utilizando a convenção de meio de ano, é de USD 26,215 M. O resumo dos resultados da análise de fluxo de caixa é apresentado na Tabela 19-2.

Valor presente líquido do fluxo de caixa global	Unidade	Valor
Receita Total	US\$ M	70.616
Custos e despesas total	US\$ M	-31.163
Mina e planta	US\$ M	-10.343
Logística e Distribuição	US\$ M	-18.150
Royalties	US\$ M	-2.459
Despesas de venda, P&D, outros	US\$ M	-142
Custos de Fechamento	US\$ M	-70
Impostos e variação de capital de giro	US\$ M	-9.134
Fluxo de caixa operacional	US\$ M	30.319
CAPEX Total	US\$ M	-4.104
Fluxo de caixa livre	US\$ M	26.215

Tabela 19-2 - Análise do fluxo de caixa

Para esta análise de fluxo de caixa, a taxa interna de retorno (IRR) e o retorno não são aplicáveis, pois não há fluxo de caixa inicial negativo (nenhum investimento inicial a ser recuperado).

19.4. Análise de sensibilidade

Os riscos do projeto podem ser identificados em termos econômicos e não econômicos. Os principais riscos econômicos foram examinados por meio de sensibilidades de fluxo de caixa em VPL pós-imposto a uma taxa de desconto de 7,5%. Os seguintes itens foram examinados:

- Preço e VIU;
- OPEX de mina, planta, logística e distribuição;

- Taxa de câmbio;
- Total CAPEX;

As sensibilidades são mostradas na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Ao aplicar a análise de sensibilidade nas principais variáveis, o VPL permanece positivo, confirmando a robustez das reservas minerais

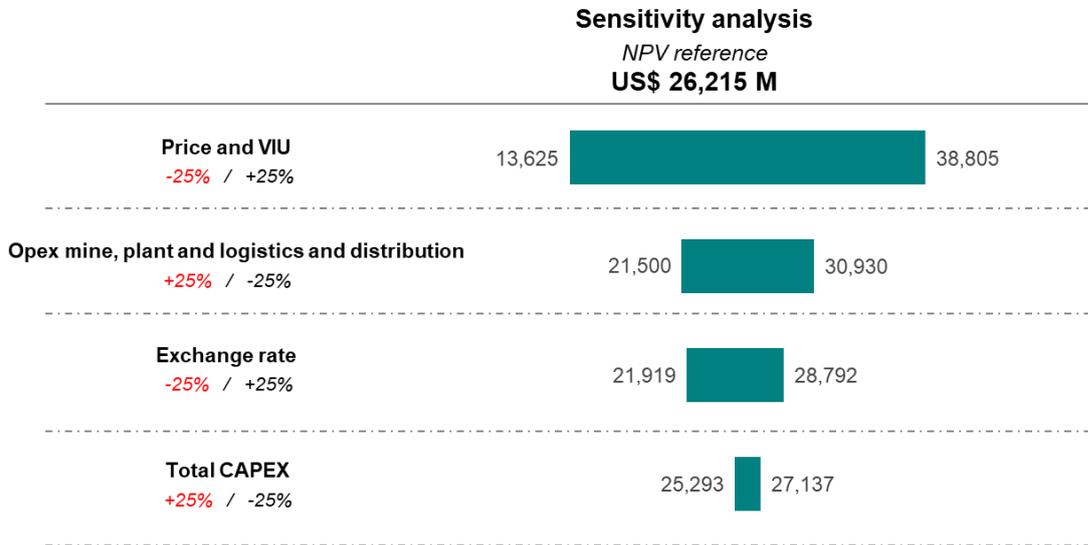


Figura 19-2 - Análise de Sensibilidade

Legenda:

Análise de sensibilidade
Referência VPL
USD 26.215 M

Preço e VIU

Opex de mina, planta, logística e distribuição

Taxa de câmbio

Total CAPEX

Sensitivity analysis
NPV reference
US\$ 26,215 M

Price and VIU

Opex mine, plant and logistics and distribution

Exchange rate

Total CAPEX

20. Propriedades adjacentes

Este capítulo não é relevante para este Relatório.

21. Outros dados e informações relevantes

Este capítulo não é relevante para este Relatório.

22. Interpretação e conclusões

22.1. Descrição da propriedade

As cavas de recursos e reservas das minas N1, N2, N3, N4 e N5 não parecem estar associadas aos processos de mineração de outros detentores ou processos de mineração da Vale em fases anteriores. As minas em operação são N4E, N4W e N5 e possuem licenças de mineração em vigor.

O Complexo Serra Norte tem quatro servidões de lavra que são contíguas e formam um contorno único que circunscreve todas as instalações industriais atuais e futuras do Complexo Serra Norte. Duas das servidões estão autorizadas e duas estão em fase de aprovação.

22.1. Exploração, perfuração e amostragem

Todo o trabalho desenvolvido na Serra Norte segue rígidos padrões internos e as melhores práticas da indústria de mineração. As várias campanhas de sondagem realizadas nas últimas décadas, bem como todos os dados geológicos, amostragem e análise química daí resultantes, foram amplamente discutidas entre as equipes técnicas envolvidas para garantir a robustez do modelo geológico.

22.1.1. Configurações hidrogeológicas e geotécnicas

O banco de dados geotécnico e hidrológico atual foi considerado satisfatório (quantidade e qualidade) para atingir os principais objetivos, que foram a construção e calibração de modelos capazes de simular futuros cenários de lavra capazes de fornecer contribuições para análise de estabilidade de taludes, apoiar a avaliação do mecanismo de falha, fornecer informações geotécnicas de curto e longo prazo e fornecer assistência ambiental e de mineração.

As simulações hidrogeológicas mostraram resultados confiáveis e viáveis com taxas de fluxo operacionais para o rebaixamento das cavas no Complexo de Mineração Serra Norte. Os dados geotécnicos e hidrológicos obtidos e utilizados nas análises de estabilidade de taludes têm sido um preditor razoável das condições atuais e, portanto, suportaram satisfatoriamente as estimativas de reserva mineral. As análises de estabilidade de taludes obtiveram resultados confiáveis e viáveis, com fatores de segurança consistentes com os padrões internacionais mínimos estabelecidos por Read & Stacey (2009). Portanto, a geometria proposta foi considerada geotecnicamente praticável.

É importante enfatizar que quaisquer mudanças nas premissas geotécnicas e hidrológicas pode afetar o planejamento da mina, afetando indiretamente as estimativas de custo de capital se alguma reabilitação importante for necessária devido a um evento geotécnico ou hidrológico, afetar os custos operacionais devido a medidas de mitigação que podem precisar ser impostas, e impactar a análise econômica que sustenta as estimativas de reserva mineral.

22.2. Verificação de dados

Os programas de verificação de dados concluíram que os dados coletados da Serra Norte sustentam adequadamente as interpretações geológicas e constituem um banco de dados de qualidade suficiente para apoiar o uso dos dados na estimativa de recursos minerais e reservas minerais.

22.3. Geologia e mineralização

O banco de dados geológico atual permite, de forma satisfatória, definir um modelo estrutural e estratigráfico robusto, assim como as associações e entendimentos de mineralização. Embora seja recomendado manter a coleta de dados geológicos, com mapeamento, amostragem e desenvolvimento de campanhas de sondagem (curto e longo prazos), para continuar melhorando o conhecimento dos minérios de alto teor, estrutural e estratigrafia.

Todos os modelos geológicos atuais foram auditados e reproduzem satisfatoriamente a continuidade dos corpos mineralizados, seu fechamento e suas coberturas. Os modelos foram construídos por seções verticais ou métodos de modelagem implícitos, o que representa as unidades geológicas de forma aceitável.

As reais configurações de geometria estrutural/estratigráfica apresentadas são o resultado de três eventos tectônicos sucessivos, e uma pós-mineralização, principalmente por enriquecimento supergênico, desenvolvido em jaspilitos.

22.4. Declaração de recursos minerais

Os recursos minerais são relatados para o Complexo de Mineração Serra Norte, que compreende os depósitos de N1, N2, N3, N4 e N5. A Vale possui um conjunto de protocolos, controles internos e diretrizes para apoiar o processo de estimativa, que os avaliadores devem seguir. A estimativa foi feita pelo pessoal da Vale. A estimativa de recursos minerais é suportada pela sondagem testemunhada.

Os recursos minerais são reportados usando as definições de recursos minerais estabelecidas em S-K1300 e são relatados sem os recursos minerais convertidos em reservas minerais.

As áreas de incerteza que podem afetar materialmente as estimativas de recursos minerais incluem: As mudanças no preço do minério de ferro de longo prazo e projeções quanto à taxa de câmbio; mudanças nas interpretações locais de geometria de mineralização, estruturas e continuidade de zonas mineralizadas; mudanças na forma geológica e de teor e premissas geológicas e de continuidade de teor; mudanças nas premissas de entrada usadas para derivar a cava a céu aberto otimizada conceitual usada para restringir as estimativas; mudanças nas premissas de diluição e de recuperação de lavra previstas; variações nas premissas de lavra e geotécnicas e mudanças nas premissas de licença ambiental, de permissão e social.

De acordo com as premissas apresentadas neste Relatório, o Complexo de Minerário Serra Norte provou ter uma razoável perspectiva de extração econômica e, portanto, as estimativas de recursos minerais podem ser suportadas.

22.5. Estimativa de reserva mineral

As estimativas de reserva mineral da Serra Norte seguem as definições estabelecidas por SEC-SK1300 e foram estimadas em 2020 e atualizadas em 2021 pelo pessoal qualificado da Vale. Somente parte dos recursos minerais medidos e indicados são convertidos em reservas provadas e prováveis de acordo com fatores modificadores. Todas as cavas passaram por um processo de validação geotécnica e foram aprovadas.

Além dos riscos associados a preços, custos, processos, volatilidade dos preços das commodities já comentados nos capítulos 11 e 12, consideramos como riscos a liberação das reduções de raio das cavidades de máxima relevância no entorno das cavernas (N1, N2, N3, N4 e N5), no tempo necessário, entre outras licenças ambientais que estão além do nosso controle efetivo.

Como oportunidade, temos a redução de custos com a implementação do projeto Trolley e o uso de caminhões autônomos. Também temos um alto potencial para aumentar a reserva se for liberada a supressão das cavidades de máxima relevância adjacentes às cavernas que hoje são tratadas como blocos nas áreas onde estão localizadas.

Uma combinação de dados geotécnicos atuais e (históricos) pré-lavra, com a experiência do local de mineração de equipes internas apoiadas por consultores nacionais e internacionais, é usada para estabelecer diretrizes e procedimentos internos no projeto e operação de minas de cava a céu aberto da Vale. Quaisquer mudanças nas premissas geotécnicas e hidrológicas podem afetar o planejamento da mina, afetando indiretamente as estimativas de custo de capital se alguma reabilitação importante for necessária devido a um evento geotécnico ou hidrológico, afetar os custos operacionais devido a medidas de mitigação que podem precisar ser impostas, e impactar a análise econômica que sustenta as estimativas de reserva mineral.

22.6. Métodos de lavra

A mineração na Serra Norte utiliza o método de lavra a céu aberto e uma frota de equipamentos convencionais. A mina possui sua própria operação, exceto em algumas áreas específicas, como áreas de novos taludes.

Os planos de produção visam a produção média anual de cerca de 100Mt. Podem variar de acordo com o plano de produção da empresa durante toda a vida útil da mina.

22.7. Métodos de processamento e recuperação

Para o processamento de ROM com umidade natural, não há necessidade de testes de processo para controle operacional, pois é uma técnica dominada no beneficiamento do minério, onde são utilizados equipamentos tradicionais da indústria de mineração. Para que as plantas alcancem o melhor desempenho, é necessário garantir que o ROM esteja dentro dos limites estabelecidos de granulometria, a porcentagem de litologias e a qualidade de cada planta, e esse procedimento já está aplicado neste complexo. O peneiramento em umidade natural requer atenção no período chuvoso, uma vez que o ROM com maior umidade gera queda na produtividade, além de problemas de manejo. Durante esse período, uma queda de produção já é considerada no planejamento da produção e uma tentativa é feita para reduzir a porcentagem de minério úmido, pois esse tipo de minério apresenta maior dificuldade no processamento.

Para a planta úmida, há uma análise química de rotina dos principais fluxos de concentração magnética que permitirá realizar os ajustes operacionais necessários. Os concentradores magnéticos aplicados neste projeto são equipamentos bem conhecidos da Vale e permitem a otimização da recuperação em massa ou qualidade por meio de simples mudanças nos parâmetros operacionais. A recuperação em massa da concentração magnética dependerá do conteúdo do fluxo. Se houver algum desvio que não possa ser resolvido por meio de ajustes nos parâmetros operacionais, as amostras serão coletadas para caracterização tecnológica e testes piloto para identificar as causas do problema e propor soluções.

22.8. Estudos ambientais, permissões e planos, negociações ou acordos com indivíduos ou grupos locais

O Complexo Serra Norte possui controles e monitoramento ambientais que visam assegurar ou identificar rapidamente possíveis desvios operacionais que possam causar danos ao meio ambiente. As atuais expansões de produção não exigiram grandes expansões de controles e monitoramento devido à robustez e adequação dos controles e programas no local.

A lavra próxima às condições mais restritas, como cavidades, possui programas e monitoramento específicos que visam garantir a produção sem causar danos irreversíveis.

22.9. Estimativa de custos de capital

As avaliações econômicas consideram o capital total de investimento corrente, necessário para a manutenção de ativos/operações existentes e projetos de capital que visam manter e/ou aumentar a capacidade produtiva nos fluxos de caixa. O capital total de investimento corrente pode ser classificado em rotineiro e não rotineiro.

Rotineiro refere-se a projetos destinados a manter a capacidade operacional dos ativos, incluindo aquisição e substituição de equipamentos e reajuste de estruturas operacionais. Eles são estimados com base em um diagnóstico feito pela área de Engenharia sobre a base de ativos, em um atraso de manutenção e sobre o investimento, meta definida pela empresa para os próximos anos.

Não rotineiro refere-se a projetos que suportam a estratégia do negócio, garantindo a conformidade com o plano de produção, mas que não ocorrem com frequência. Incluídos nesta lista: expansão de cavas, projetos de disposição de estéril e rejeitos, mudanças nos processos e tecnologias nas plantas, entre outros. Eles são estimados com base nas necessidades esperadas de cada operação ou complexo de produção no horizonte avaliado. Com base nessas necessidades, as equipes

multidisciplinares da Vale estimam os valores dos investimentos considerados nos fluxos de caixa das avaliações econômicas.

Além disso, avaliações econômicas das reservas consideram projetos de capital que visam manter e/ou aumentar a capacidade produtiva. A estimativa geral de custo de capital para LOM ou período de avaliação é de USD 6.202 milhões.

22.10. Estimativas de custo operacional

As despesas e os custos operacionais são agrupados da seguinte forma:

- Opex de mina e planta: custos de mina e planta incluem mineração, processamento, armazenamento e transporte do minério para os pontos de carregamento.
- Custos de logística e distribuição: custos de logística e distribuição incluem ferrovias, portos, frete marítimo e centros de distribuição.
- Vendas, P&D e despesas pré-operacionais: vendas, P&D e despesas pré-operacionais estão relacionadas às despesas da equipe com vendas e escritórios, despesas com pesquisa e desenvolvimento de soluções para projetos e/ou manutenção de operações e despesas pré-operacionais, quando há projetos em implantação.

Em resumo, o Opex de mineração é projetado considerando como referência, os custos da operação ou operações similares em anos anteriores e seus respectivos indicadores operacionais. Assim, os indicadores operacionais futuros das operações são estimados com base no planejamento de mina de longo prazo. Dessa forma, os custos estimados são projetados considerando as futuras mudanças nos indicadores operacionais das operações.

- Despesas e custo operacional unitário médio de LOM;
- Mina e planta: 11.0 USD/tonelada de produto;
- Logística e Distribuição: 19,3 USD/tonelada de produto;
- Royalties: 2,5 USD/tonelada de produto;
- Despesas de vendas, P&D, outros: 0,1 USD/tonelada de produto;
- Total de despesas e custos operacionais unitários médios: 33.0 USD/tonelada de produto;
- A estimativa de custos e despesas gerais para LOM ou período de avaliação é de USD 51.872 milhões.

22.11. Análise econômica

O objetivo da avaliação econômica apresentada é demonstrar a viabilidade econômica da reserva mineral, portanto, as taxas de produção, eficiências operacionais, custos e despesas, impostos e outras informações apresentadas podem diferir de outras informações que publicamos e não devem ser consideradas como guidance. Observe que nossa produção planejada pode variar devido à exploração mineral contínua e estudos técnicos para adicionar novas reservas minerais.

A análise econômica confirmou que a Serra Norte é economicamente viável. O VPL pós-imposto a uma taxa de desconto de 7,5% e usando a convenção de meio de ano é de USD 26.215 milhões.

Para esta análise de fluxo de caixa, a taxa interna de retorno (IRR) e o retorno não são aplicáveis, pois não há fluxo de caixa inicial negativo (nenhum investimento inicial a ser recuperado).

Os riscos do projeto podem ser identificados em termos econômicos e não econômicos. Os principais riscos econômicos foram examinados por meio de sensibilidades de fluxo de caixa em VPL pós-imposto a uma taxa de desconto de 7,5%. Os seguintes itens foram examinados: Preço e VIU; OPE de mina, planta, logística e distribuição; Taxa de câmbio e CAPEX total.

22.12. Riscos e oportunidades

22.12.1. Estimativas de recursos minerais

Os fatores que podem afetar as estimativas de recursos minerais e reservas minerais foram identificados no Capítulo 11 e no Capítulo 12, respectivamente.

Outros riscos observados incluem:

- O decreto federal de 2008 estabeleceu o critério de classificação de cavidades com base na sua relevância (máxima, alta, média ou baixa). Este decreto não permite impactos negativos e irreversíveis em cavidades classificadas como de máxima relevância e, por outro lado, permite impactos nas demais categorias de cavidades, diante de licenciamento ambiental aplicável e/ou compensação. Uma resolução definiu o buffer de 250 metros, como área de influência padrão a ser preservada no entorno das cavidades. Estudos ambientais podem ser apresentados ao órgão ambiental para melhor definição da área de influência, permitindo sua redução. Especificamente para algumas cavidades de máxima relevância, a reserva mineral estimada de Serra Norte considerou um raio de 150 metros para a proteção das mesmas, sendo que, no caso dos recursos minerais, não foi aplicada restrição. A proposta de alteração da área de influência precisa ser analisada e aprovada pelos institutos ambientais federais brasileiros e, dependendo da decisão, pode-se ter impactos positivos ou negativos nas reservas e recursos minerais declarados. Em janeiro de 2022, um novo decreto federal foi editado, revogando a regulamentação de 1990 e suas alterações posteriores e estabelecendo novas regras para proteção de cavernas, inclusive no que diz respeito a classificações de relevância e formas de compensação, e o impacto disso em nossas operações é sob revisão. Este decreto de 2022, no entanto, está sendo contestado no STF por um partido político sob o argumento de que tal regulamento é inconstitucional, uma vez que supostamente reduz a proteção legal das cavernas e foi temporariamente suspenso até nova decisão do tribunal.
- The Carajás National Forest (FLONA Carajás) was created in 1998 as a conservation unit in which the management of natural resources is allowed. FLONA Carajás has an environmental Management Plan, which defines a land zoning, encompassing the “Mining Zone” category. The Management Plan has legal provision to be reviewed and the last revision was in 2016. A portion of Serra Norte deposit is outside the Mining Zone and depends on the modification of this status to allow mining activities. We have a reasonable expectation that the Management Plan will be revised, depending on the assessment and approval of Brazilian federal environment institutes. If our petition is denied (or partially approved), a portion of the mineral reserves and resources will be affected.
- As premissas geotécnicas e hidrológicas usadas no planejamento da mina são baseadas no desempenho histórico e, até o momento, o desempenho histórico tem sido um preditor razoável das condições atuais. À medida que a cava tende a ficar mais profunda; no entanto, a coleta adicional de dados geotécnicos e hidrológicos é garantida. Quaisquer mudanças nas premissas geotécnicas e hidrológicas pode afetar o planejamento da mina, afetar as estimativas de custo de capital se alguma reabilitação importante for necessária devido a um evento geotécnico ou hidrológico, afetar os custos operacionais devido a medidas de mitigação que podem precisar ser impostas, e impactar a análise econômica que sustenta as estimativas de reserva mineral;

As oportunidades incluem:

- A mineralização dos depósitos de Serra Norte permanece aberta em profundidade sob o atual esboço de cava a céu aberto. A avaliação de exploração adicional é garantida;
- Conversão potencial dos recursos minerais medidos e indicados relatados sem reservas minerais, com estudos de apoio, para reservas minerais;
- Conversão potencial de recursos minerais inferidos, com estudos de apoio, para classificações de recursos minerais de maior confiança;

22.12.2. Declaração de reservas minerais

Além dos riscos associados a preços, custos, processos, volatilidade dos preços de commodity já mencionados nos capítulos 11 e 12, a liberação de reduções de raio em cavidades de máxima

relevância no entorno das cavas (N1, N3, N4 e N5), no tempo necessário, entre outras licenças ambientais que estão além do nosso controle efetivo, são considerados riscos.

Como oportunidade, temos a redução de custos com a implementação do projeto Trolley e o uso de caminhões autônomos. Também temos um alto potencial para aumentar a reserva se for liberada a supressão das cavidades mais relevantes adjacentes às cavas, atualmente tratadas como bloqueios nas áreas onde estão.

23. Recomendações

Se aplicável, a pessoa qualificada deve descrever as recomendações para trabalho adicional com custos associados. Se o programa de trabalho adicional for dividido em fases, os custos de cada fase devem ser fornecidos juntamente com os pontos de decisão no final de cada fase.

23.1. Descrição da propriedade

Recomenda-se prosseguir com ANM para emitir o relatório sobre as servidões de lavra em aprovação.

23.2. Geologia e mineralização

Recomenda-se manter a rotina de trabalhos de coleta de dados geológicos com mapeamentos, amostragem e desenvolvimento de campanhas de sondagem (curto e longo prazos), para continuar melhorando o conhecimento dos minérios de alto teor, estrutural e estratigrafia.

Trabalho adicionalé necessário para determinar o potencial de exploração abaixo das atuais operações de cava a céu aberto e platôs não operados. Os alvos de exploração estão principalmente associados aos afloramentos de cangas estruturadas, hematitas friáveis e jaspilitos, ou anomalias geofísicas.

23.3. Hidrogeologia e Geotecnia

Com relação às considerações geotécnicas e hidrogeológicas, recomenda-se desenvolver um Plano de Gestão de Controle de Solo eficaz, um Programa de Garantia de Qualidade e Controle de Qualidade completo, e promover o aumento contínuo da melhoria do banco de dados (sondagens e testes) para reduzir o acúmulo de dados identificado e fornecer informações de novas áreas. Isso fornecerá uma base sólida para avaliação geotécnica e hidrogeológica, modelagem e medidas de mitigação.

Para atingir o nível de maturidade dos estudos geotécnicos e hidrogeológicos das minas ao longo do ciclo de vida útil do projeto, é necessário refinar continuamente o banco de dados hidro e geotécnico, modelos e programas de monitoramento.

23.4. Declaração de recursos minerais

A continuidade dos planos anuais de sondagem geológica para avaliar melhor a geologia em profundidade, aumentando o conhecimento geológico e a confiança para converter classes inferidas e indicadas para categorias indicadas e medidas.

23.5. Reservas minerais e métodos de lavra

As taxas de diluição e recuperação da lavra utilizadas nas estimativas de reserva podem ser mais assertivas. Para isso, a Vale deve planejar a perfuração para melhorar a interpretação geológica e a estimativa de teores e aprimorar o processo de reconciliação com a implantação de mais amostradores que possam melhorar a assertividade das premissas de diluição e perda que sustentam a declaração de reservas.

Buscar novas tecnologias para minimizar a necessidade de revestimento, especialmente nos depósitos de estéril e nas frentes de lavra que possuem um piso sob material macio (principalmente máfica decomposta).

23.6. Métodos de processamento e recuperação

Verificação dos controles de processos existentes para identificar oportunidades, gargalos e/ou melhorias para otimização de processos, especialmente na estação chuvosa quando a produtividade do processamento é menor.

Opinião do PQ: A rota do processo para processamento do material de Serra Norte é altamente confiável, pois envolve equipamentos tradicionais de beneficiamento, onde a Vale tem ampla experiência nesse tipo de processo. Através desta rota, pode gerar alto volume de produção com qualidade satisfatória.

23.7. Estudos ambientais, permissões e planos, negociações ou acordos com indivíduos ou grupos locais

Continuar o monitoramento e programas ambientais que assegurem a mitigação dos impactos ambientais decorrentes das operações.

No contexto do complexo Serra Norte, é importante continuar as discussões iniciadas com o órgão de gestão das Unidades de Conservação para desenvolver estudos e informar a decisão de alterar o zoneamento do plano de gestão para permitir a expansão da zona de mineração que atualmente impede a expansão da mineração.

23.8. Custos e economia

Manter o foco na disciplina de alocação de capital e eliminação de possíveis ineficiências, para garantir, com segurança operacional, competitividade de custos e, conseqüentemente, margens e balanços saudáveis em qualquer cenário de preços.

24. Referências

- ALMEIDA F.F.M., AMARAL G., CORDANI U.G., KAWASHITA K. 1973. The Precambrian evolution of the South America cratonic margin South of the Amazon River. In: A. E. M. Nairn & F. G. Stehli (eds.) *The ocean basins and margins*. New York, Plenum Publishing, p. 411-446.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Sciences Reviews* 17, 1-29.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUÍ, Y. *O pré-cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. 378 p.
- Almeida, J.A.C.; Dall'Agnol, R.; Oliveira, M.A.; Macambira, M.J.B.; Pimentel, M.M.; Rämö, O.T.; Guimarães, F.V.; Leite, A.A.S. 2011. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, 120, 235-257.
- ALMEIDA, J.A.C.; DALL'AGNOL, R.; LEITE, A.A.S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of south American Earth Sciences*, 42:103-127.
- ALTHOFF, F.J.; BARBEY, P.; BOULLIER, A.M. 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*, v. 104, p. 187-206.
- ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N. 1991. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. Brasília: DNPM/ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, 152 p.
- AVELAR, V.G.; LAFON, J.M.; CORREIA, F.C.JR.; MACAMBIRA, B.E.M. 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás, Amazônia Oriental, Brasil: novos dados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geologia*, 29: 453-460.
- BARBOSA, O.; RAMOS, J.R. DE A.; GOMES, F. DE A. HELMBOLD, R. 1966. Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do Projeto Araguaia. Monografia, DNPM/DGM. Rio de Janeiro 94 p.
- BARROS, C.E.M. 1997. Pétrologie et structure du Complexe Granitique Estrela (2.5GA) et de son encaissant métavolcano-sédimentaire (Province Métallifère de Carajás, Brésil). Tese de Doutorado, Université Henri Poincaré, Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, (CRPG-UPR9046), 316p.
- BARROS, C.E.M.; MACAMBIRA, M.J.B.; BARBEY, P. 2001. Idade de zircão do Complexo Granítico Estrela: relações entre magmatismo, deformação e metamorfismo na Província Mineral de Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7, Belém. Resumos Expandidos. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia. P.17-20.
- BARROS, C.E.M.; MACAMBIRA, M.J.B; BARBEY, P.; SCHELLER, T. 2004. Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: Implicações petrológicas e tectônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(4), p. 531-538.
- BERNI, G.V. 2009. Geologia e alteração hidrotermal do depósito de Au-Pd-Pt de Serra Pelada, Curionópolis, Pará, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 116 p.
- BERNI, G.V.; HEINRICH, C.A.; LOBATO, L.M.; WALL, V.J.; ROSIÈRE, C.A.; FREITAS, M. 2014. The Serra Pelada Au-Pd-Pt Deposit, Carajás, Brazil: Geochemistry, Mineralogy, and Zoning of Hydrothermal Alteration. *Economic Geology*, v. 109, pp. 1883-1899.
- BEISIEGEL, V. R.; BERNARDELLI, A.L.; DRUMMOND, N.F.; RUFF, A.W.; TREMAINE, J.W. 1973. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geologia*, 3(4): 215-242.
- CABRAL, A.R; CREASER, R.A; NAGLER, T.; LEHMANN, B.; VOEGELIN, A.R.; BELYATSKY, B.; PASAVA, J.; SEABRA; A.A.G.; GALBIATTI, H.; BOTTCHER, M.E.; ESCHER, P. 2013. Trace element and multi-isotope geochemistry of Late-Archean black shales in the Carajás iron-ore district, Brazil, *Chemical Geology*, doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.08.041

- CABRAL, A.R.; BÜHN, B.; GOMES JR, A.A.S.; GALBIATTI, H.F.; LEHMANN, B.; HALDER, S. 2017. Multiple sulfur isotopes from the Neoproterozoic Serra Sul black shale, Carajás mineral province, northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 79, p. 377-383.
- CORDANI, U.G.; RAMOS, V.A.; FRAGA, L.M.; CEGARRA, M.; DELGADO, I.; SOUZA, K.G.; GOMES, F.E.M.; SCHOBENHAUS, C. 2016. Tectonic map of South America. 2nd. ed. Paris: CGMW-CPRM-SEGEMAR, 2016. 1 map. Scale 1:5.000.000.
- COSTA, U.A.P.; SILVA, D.P.B.; BARBOSA, J.D.P.D.O.; OLIVEIRA, J.K.M.; PAULO, R.R.; RAPHAEL N. ARAÚJO, MARCELO J. DE SOUZA. 2017. Carajás Project. *In: Brazil: Geological Survey Under the Spotlight / Editores Noevaldo A Teixeira e Marco T. N. Carvalho. – Brasília: CPRM.*
- CVRD/AMZA. 1972. Relatório de Pesquisa – Distrito Ferrífero Serra dos Carajás, Estado do Pará. Volume II – Mapas e Seções, 119, Report to the Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, for the Companhia Vale do Rio Doce, Rio de Janeiro, Brazil.
- DALL'AGNOL R.; BETTERCOURT, J.S.; JOÃO, X.S.J.; MEDEIROS, H.; COSTI, H.T.; MACAMBIRA, M.J.B. 1987. Granitogenesis in northern Brazilian region: a review. *Revista Brasileira de Geologia*, 17:382-403.
- DALL'AGNOL, R.; SOUZA, Z.S.; ALTHOFF, F.J.; BARROS, C.E.M.; LEITE, A.A.S.; JORGE JOÃO, X.S. 1997. General aspects of the granitogenesis of the Carajás metallogenic province. CBPM, ISGAM, 2, 135-142.
- DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M.D.; ALMEIDA, J.D.; ALTHOFF, F.J.; LEITE, A.D.S.; OLIVEIRA, D.C.; BARROS, C.E.M. 2006. Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. *In Symposium on magmatism, crustal evolution, and metallogenesis of the Amazonian Craton. Abstracts Volume and Field Trip Guide. Belém, PRONEX-UFGA-SBGNO (pp. 99-150).*
- DOCEGEO, 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. XXXV Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, SBG, Proceedings, 11-54.
- FERREIRA FILHO, C.F.; CANÇADO, F.; CORREA, C.; MACAMBIRA, E.M.B.; JUNQUEIRA-BROD, T.C.; E SIEPIERSKI, L. 2007. Mineralizações estratiformes de PGE-Ni associadas a complexos acamadados em Carajás: os exemplos de Luanga e Serra da Onça. *In: Rosa-Costa, L. T., Klein, E.L., Viglio, E.P. (Ed.). Contribuições à geologia da Amazônia. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 5, p. 1-14.*
- Galbiatti, H.F.; Endo, I.; Delgado, C.E.R.; Zapparoli, A.C.; Carlos, D.U.; G.M. Moreira; Pereira, W.R.; Assis, L.M.; Costa, L.C.G. *Em prep. Tectonic framework under compressional regimes in Carajás Mineral Province – Pará State – Brazil.*
- GANADE, C.E.; GRIFFIN, W.L.; WEINBERG, R.F.; BELOUSOVA, E.; TADENAKA, L.B.; LOPES, L.L.; LACASSE, C.M.; CAMPOS, L.D. On the origin of oldest Iron-Oxide-Copper-Gold (IOCG) deposits at the transition from Archean drip to plate tectonics, 02 August 2020, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-50946/v1>].
- GIBBS, A.K.; WIRTH, K.R.; HIRATA, W.K.; OLSZEWSKI JR., W.J. 1986. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 16: 201–211.
- GÓMEZ, J.; SCHOBENHAUS, C.; MONTES, N.E.; COMPILERS. 2019. GEOLOGICAL MAP OF SOUTH AMERICA 2019. Scale 1:5 000 000. Commission for the Geological Map of the World (CGMW), Colombian Geological Survey and Geological Survey of Brazil. Paris.
- HIRATA, W.K.; RIGON, J.C.; KADEKARU, K.; CORDEIRO, A.A.C.; MEIRELES, E.A. 1982. Geologia Regional da Província Mineral de Carajás. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 1, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 100–110.*
- LIMA, F.D.; PINHEIRO, R.V.L. 2001. Formação Gorotire: Consideração sobre uma unidade siliciclástica particular da Serra dos Carajás-PA. *In: REIS, N.J.; MONTEIRO, M.A.S. Contribuição à Geologia da Amazônia. Manaus. SBG, Núcleo Norte. v.2: p. 205-229.*
- LINDENMAYER, Z.G.; RONCHI, L.H.; LAUX, J.H. 1988. Geologia e Geoquímica da mineralização de Cu-Au primária da mina de Au do Igarapé Bahia, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geologia*, 28:257-268.

- Lobato, L.M.; Rosière, C.A.; Silva, R.C.F.; Zucchetti, M.; Baars, F.J.; Seoane, J.C.S.; Rios, F.J.; Pimentel, M.; Mendes, G.E.; Monteiro, A.M. 2005. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás - Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província, *In*: Marini, O.J.; Queiroz, E.T.; Ramos, B.W. (eds)., *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia: Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM)/Fundo Setorial Mineral (CT-Mineral/FINEP)/Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira (ADIMB)*, Brasília, Brazil, p. 25–92.
- MACAMBIRA, J.B. 2003. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Tese de Doutorado, 212 p.
- MACAMBIRA, M.J.B.; LAFON, J.M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás; síntese dos dados e novos desafios. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 7, 263-288.
- MACAMBIRA, E.M.B.; RICCI, P.S.F.; ANJOS, G.C. 2014. Programa Geologia do Brasil - PGB Repartimento - SB.22-X-A Estado do Pará - Carta Geológica Belém: CPRM, 2015, 1 mapa colorido, Escala 1:250.000.
- MACHADO, N.; LINDENMAYER, D.H.; KROUGH, T.E.; LINDENMAYER, Z.G. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49:329-354.
- MEDEIROS FILHO, C.A.; MEIRELES, E.M. 1985. Dados preliminares sobre a ocorrência de cromita na área de Luanga. *SIMP. GEOL. AMAZ*, 2, 90-96.
- MEIRELES, E.M.; TEIXEIRA, J.T.; LOURENÇO, R.S.; MEDEIROS FILHO, C.A. 1982. Geologia estrutura e mineralização aurífera de Serra Pelada. *Anais*, 31 Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador. v3, 900-910.
- NASCIMENTO M.S.; OLIVEIRA, A. 2015. Ambiente deposicional e proveniência da Formação Gorotire, Província Carajás, sudeste do Cráton Amazônico. *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Edition: 9. Chapter: 1
- NOGUEIRA, A.C.R. 1995. Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, região central da Serra dos Carajás-Pará. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 167 p.
- OLIVEIRA, M.A.; DALL'AGNOL, R.; ALTHOFF, F.J.; LEITE, A.A.S. 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 27, 146-160.
- OLIVEIRA, A.; NASCIMENTO M.S. 2015. Ambiente deposicional fluvial entrelaçado da Formação Gorotire no leste da Serra dos Carajás, SE do Cráton Amazônico. *Anais do 13º Simpósio de Geologia da Amazônia*
- PEREIRA, R.M.P. 2009. Geologia da região sul da Serra Norte e características do minério de ferro do Depósito N8, Província Mineral Carajás. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 131 p.
- PEREIRA, R.M.P.; ROSIÈRE, C.A.; SANTOS, J.O.S.; LOBATO, L.M.; FIGUEIREDO E SILVA, R.C.; MCNAUGHTON, N.J. 2009. Unidade Caninana: sequência clástica paleoproterozoica revelada por datação U-Pb em zircões detríticos da Província Mineral Carajás. *In*: Simpósio de Geologia da Amazônia, 11, Manaus, pp. 376-379.
- PINHEIRO, R.V.L.; HOLDSWORTH R.E. 1997. Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. *Journal of the Geological Society of London*, 154: 99-103.
- PINHEIRO, R.V.L.; HOLDSWORTH, R.E. 2000. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(4):597-606.
- ROSIÈRE, C.A.; BAARS, F.J.; SEOANE, J.C.S.; LOBATO, L.M.; SILVA, L.L.; SOUZA, S.R.C.; MENDES, G.E. 2006. Structure and iron mineralisation of the Carajás Province. *Applied Earth Science IMM Transactions section B*. V115 N4. P. 126-133

- RUFFET, G.; INNOCENT, C.; MICHARD, A.; FÉRAUD, G.; BEAUVAIS, A.; NAHON, D.; HAMELIN, B. 1996. A geochronological $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and $^{87}\text{Rb}/^{81}\text{Sr}$ study of K-Mn oxides from the weathering sequence of Azul, Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(12), 2219-2232.
- SALGADO, S.S.; CAXITO, F.A.; SILVA, R.C.F.; LANA, C. 2019. Provenance of the Buritirama Formation reveals the Paleoproterozoic assembly of the Bacajá and Carajás blocks (Amazon craton) and the chronocorrelation of Mn-deposits in the Transamazonian/Birimian System of northern Brazil/West Africa. *Journal of South American Earth Sciences*, (96):102364.
- SANTOS, J.O.S, HARTMANN, L.A., GAUDETTE, H.E., GROVES, D.I., MCNAUGHTON, N.J., FLETCHER, I.R. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, 3(4):453-488.
- SANTOS, J.O.S. 2003. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central. In: BIZZI, L.A. et al. (Coords.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília: CPRM, 2003. Escala 1:2.500.000. Sistema de Informações Geográficas - SIG. CPRM, Brasília, p. 169-226.
- SILVA, R.C.F.; LOBATO, L.M.; ROSIÈRE, C.A. 2008. A Hydrothermal Origin for the Jaspilite-Hosted, Giant Serra Norte Iron Ore Deposits in the Carajás Mineral Province, Pará State, Brazil. In: Hagemann et al. (eds): *Banded Iron Formation-Related High-Grade Iron Ore*. Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geologists. 15, 223–254.
- Silva, G.G.; Lima, J.J.C.; Andrade, A.R.F.; Issler, R.S.; Guimarães, G. 1974. Geologia da Folha SC.22 – Tocantins. DNPM, Rio de Janeiro, 143p.
- SOUZA, Z.S.; POTREL, H.; LAFON, J.M.; ALTHOFF, F.J.; PIMENTEL, M.M.; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, C.G. 2001. Nd, Pb and Sr isotopes of the identidade belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the archaean geodynamic evolution of the Amazonian craton. *Precambrian Research* 109: 293–315.
- Suita, M.T.F.; Nilson, A.A. 1988. Geologia do complexo máfico-ultramáfico Luanga (Província de Carajás, Pará) e das unidades encaixantes. XXXV Cong. Bras. Geol. Belém. (6): 2813–2823.
- TALLARICO, F.H.B.; COIMBRA, C.R.; COSTA, C.H.C.. 2000. The Serra Leste sediment-hosted Au-(Pd-Pt) mineralization, Carajás Province. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 2, p. 226-229.
- TASSINARI, C.C.G.; MACAMBIRA, M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B.B. (Eds.), Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, pp. 471–
- TAVARES, F.M. 2015. Evolução geotectônica do nordeste da Província Carajás. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 115p.
- TRENDALL, A.F.; BASEI, M.A.S.; LAETER, J.R.; NELSON, D.R. 1998. SHRIMP U-Pb constraints on the age of the Carajás formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. *Journal of South American Earth Sciences* 11, 265-277.
- TROMPETTE, R.; ALVARENGA, C.J.S.; WALDE, D. 1998. Geological evolution of the Neoproterozoic Corumbá graben system (Brazil). Depositional context of the stratified Fe and Mn ores of the Jacadigo Group. *Journal of South American Earth Sciences* 11: 587-597.
- Vale. 2020. Formulário 20-F, RELATÓRIO ANUAL, DE ACORDO COM A SEÇÃO 13 OU 15(d) DA LEI DE MERCADO DE CAPITAIS DE 1934 Para o exercício encerrado em: 31 de dezembro de 2019 Número de registro na Comissão: 001-15030. Comissão de Valores Mobiliários dos Estados Unidos em 3 de abril de 2020. 200p.
- VASQUEZ, M.L.; MACAMBIRA, M.J.B.; ARMSTRONG, R.A. 2008. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic to Orosirian evolution. *Precambrian Research*, 161(3-4): pg. 279-302.
- WIRTH, K.R.; GIBBS, A.K.; OLSZEWSKI JR, W. 1986. U-Pb ages of zircons from the Grão-Pará Group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(2):195-200.

25. Confiança nas informações fornecidas pela companhia registrada

25.1. Introdução

Os PQs confiaram totalmente na companhia registrada para obter as informações usadas nas áreas observadas nas subseções a seguir. Os PQs consideram razoável confiar na companhia registrada para as informações identificadas nessas subseções, pelos seguintes motivos:

- A companhia registrada é proprietária e operadora das operações de lavra desde 1984;
- A companhia registrada empregou profissionais da indústria com experiência nas áreas listadas nas subseções a seguir;
- A companhia registrada tem um sistema formal de supervisão e governança sobre essas atividades, incluindo uma responsabilidade em diversos níveis para revisão e aprovação;
- A companhia registrada tem uma experiência considerável em cada uma dessas áreas.

25.2. Tendências Macroeconômicas

As informações relativas à inflação, taxas de juros, taxas de desconto e impostos foram obtidas da companhia registrada.

Essas informações são usadas na análise econômica no Capítulo 19. Sustentam a avaliação de razoáveis perspectivas para a extração econômica das estimativas de recursos minerais no Capítulo 11 e contribuições para a determinação da viabilidade econômica das estimativas de reserva mineral no Capítulo 12.

25.3. Mercados

Informações relativas a estudos de mercado/mercados de produtos, estratégias de entrada no mercado, contratos de marketing e vendas, avaliação de produtos, especificações de produtos, encargos de refino e tratamento, custos de transporte, relações com agências, contratos de materiais (por exemplo, lavra, concentração, fundição, refino, transporte, manuseio, acordos de cobertura, contratos de venda futura) e status do contrato (em vigor, renovações) foram obtidas da companhia registrada.

Essas informações são usadas na análise econômica no Capítulo 19. Suportam a avaliação de razoáveis perspectivas para a extração econômica das estimativas de recursos minerais no Capítulo 11 e contribuições para a determinação da viabilidade econômica das estimativas de reserva mineral no Capítulo 12.

25.4. Assuntos Legais

Informações relacionadas à participação societária, royalties, ônus, servidões e direitos de passagem, violações e multas.

Essas informações são utilizadas para apoiar a descrição da propriedade e informações de propriedade no Capítulo 3, as descrições de autorização e fechamento de mina no Capítulo 17 e a análise econômica no Capítulo 19. Sustentam as razoáveis perspectivas de extração econômica para as estimativas de recursos minerais no Capítulo 11 e as premissas usadas para demonstrar a viabilidade econômica das estimativas de reserva mineral no Capítulo 12.

25.5. Assuntos Ambientais

Informações relativas aos estudos de apoio e linha de base para exigências de autorização ambiental e monitoramento, capacidade de manter e renovar licenças, controles de emissões,

planejamento de fechamento, requisitos de ligação e ligação de recuperação e fechamento, acomodações de sustentabilidade, e o monitoramento e conformidade com os requisitos relativos a áreas protegidas e espécies protegidas foram obtidas da companhia registrada.

Essas informações são utilizadas ao discutir informações de propriedade no Capítulo 3, as discussões de autorização e fechamento no Capítulo 17 e a análise econômica no Capítulo 19. Sustentam as razoáveis perspectivas de extração econômica para as estimativas de recursos minerais no Capítulo 11 e as premissas usadas para demonstrar a viabilidade econômica das estimativas de reserva mineral no Capítulo 12.

25.6. Acomodação das Partes Interessadas

Informações relativa aos estudos de apoio e linha de base social e das partes interessadas, políticas de contratação e treinamento para força de trabalho das comunidades locais, parcerias com partes interessadas (incluindo associações de mineração nacionais, regionais e estaduais; organizações comerciais; organizações de pesca; câmaras de comércio estaduais e locais; organizações de desenvolvimento econômico; organizações não governamentais; e governos estaduais e federais), e o plano de relações na comunidade foram obtidos da companhia registrada.

Essas informações são utilizadas nas discussões sociais e comunitárias no Capítulo 17 e na análise econômica no Capítulo 19. Sustentam as perspectivas razoáveis de extração econômica para as estimativas de recursos minerais no Capítulo 11 e as premissas usadas para demonstrar a viabilidade econômica das estimativas de reserva mineral no Capítulo 12.

25.7. Fatores Governamentais

Informações relacionadas a considerações de tributação e royalties no nível do Projeto, requisitos de monitoramento e frequência de monitoramento, requisitos de ligação, violações e multas, foram obtidas da companhia registrada.

Essas informações são utilizadas na discussão sobre royalties e ônus de propriedade no Capítulo 3, nas discussões de autorização e fechamento no Capítulo 17 e na análise econômica no Capítulo 19. Sustentam as razoáveis perspectivas de extração econômica para as estimativas de recursos minerais no Capítulo 11 e as premissas usadas para demonstrar a viabilidade econômica das estimativas de reserva mineral no Capítulo 12.

