



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 470

**MINERAIS DE MANGANÊS COMO CONTAMINANTES DO
MINÉRIO DE FERRO NA MINA N5W EM CARAJÁS, PARÁ**

Dissertação apresentada por:

LUIZ CLAUDIO GONÇALVES DA COSTA

Orientador: Prof. Dr. MARCONDES LIMA DA COSTA (UFPA)

**BELÉM
2015**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências - SIBI/UFPA

Costa, Luiz Cláudio Gonçalves da, 1975-

Minerais de manganês como contaminantes do minério de ferro na mina N5W em Carajás, Pará / Luiz Cláudio Gonçalves da Costa. – 2015.

xvi, 72 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Marcondes Lima da Costa

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2015.

1. Minérios de manganês - Pará. 2. Silicatos - Pará. 3. Sílica - Pará. 4. Hematita - Pará. 5. Poluentes - Pará I. Título.

CDD 22. ed. 553.4629098115



Universidade Federal do Pará

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**MINERAIS DE MANGANÊS COMO CONTAMINANTES DO
MINÉRIO DE FERRO NA MINA N5W EM CARAJÁS, PARÁ**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

LUIZ CLÁUDIO GONÇALVES DA COSTA

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.**

Data de Aprovação: 29/09/2015

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa
(Orientador-UFPA)**

**Prof. Dr. Herbert Pöllmann
(Membro Martin Luther University of Halle - Wittenberg)**

**Prof.ª Dr.ª Sônia Maria Barros de Oliveira
(Membro-USP)**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder saúde e força para superar os desafios.

Ao meu orientador Professor Dr. Marcondes Lima da Costa por sua valiosa orientação e empenho dedicado na elaboração desta Dissertação de Mestrado, ajudando no meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Obrigado pela confiança e paciência.

Aos Professores Herbert Pöllmann e Sônia Maria Barros de Oliveira pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Aos colegas e professores do Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada da UFPA (GMGA-UFPA) pelas discussões, em especial à Suyanne Flávia, André Heron, Patrícia Pinheiro, Fernanda Carvalho, Alessandro Sabbá, Rose e Glayce Souza, suas contribuições foram importantíssimas para o desenvolvimento deste trabalho.

Sou grato à geóloga Heliana Pantoja, grande amiga que dedicou parte do seu tempo para me ajudar, sendo muito companheira e tendo muita paciência comigo.

Ao projeto INCT-GEOCIAM pelo suporte e apoio financeiro e ao Laboratório de Caracterização Mineralógica pelas análises de DRX.

À Vale S.A. por contribuir com meu desenvolvimento profissional e pessoal, apoio logístico, concessão de testemunhos de sondagem e amostras, além da liberação dos dados geológicos. Em especial aos geólogos Henry Galbiatti, Marco Braga e Luciano Fonseca.

Sou agradecido, ainda, à geóloga Adriana Zaparolli pela ajuda na coleta de amostras e descrições petrográficas. Bem como, Edson França, Carlos Delgado, Marcos Freire, Ivan Andrade, Carlos Medeiro, Flávio Freitas, Luciano Assis, Julielson Camelo, Fernando Prezotti, Virgínia Porfiro, Anderson Couto, Marcus Pira, Cláudio Rosas, Richellen Barbosa, Marcos Pires, Aristotelina Silva, Valber Gaia, Hudson Silva, Raquel, Fabio Henrique, Roberto Carvalho, Igor Rosa, Delvan Souza, Paulo, Lira, Jeanderson, França, Wendel e “Jacaré” pelos incentivos, discussões, sugestões e apoio na logística de campo.

A minha esposa Flaviana Oliveira e meus filhos Patrick e Felipe que contribuíram com todo seu amor e carinho para a conclusão deste trabalho. Aos demais familiares que torceram e acreditaram em mim.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Atualmente a caracterização mineralógica e controle do manganês e da sílica nas minas de minério de ferro de Carajás tornam-se indispensáveis. Pois concentrações elevadas de seus minerais foram encontradas, os quais são vistos como impurezas indesejáveis no minério, em especial da mina de N5W, com teores superiores a 65 % de Fe. O presente trabalho objetiva identificar esses minerais, o seu modo de ocorrência e relação com o minério de ferro na mina N5W, na tentativa de contribuir para minimização do seu impacto durante a operação de lavra do minério de ferro.

Os principais minerais de manganês identificados foram pirolusita, bixbyita, criptomelana, hollandita, ramsdellita e calcofanita, todos oxi-hidróxidos de Mn, exceto a braunita também identificada nesta mina, que é um silicato. Estes minerais geralmente estão alojados em veios e vênulas hidrotermais que interceptam o minério de ferro. Mas ocorrências, em menor proporção, entre as camadas de jaspilitos também são observadas, como aparente ligação com pequenas lentes. Aparentemente pelo menos dois modos de ocorrências foram individualizados na mina de N5W, cada um com mineralogia de Mn específica: zonas de falhas, brechas e veios com pirolusita, calcofanita, braunita e bixbyita, além de possíveis lentes com criptomelana e hollandita, provável ainda que tenha havido a formação intempérica desses minerais, representados por pirolusita e criptomelana. Quartzo, oxi-hidróxidos de Fe e de Mn são os principais constituintes dos veios preenchendo falhas e fraturas em N5W, com MnO atingindo teores de até 61,74 % nesses veios.

Sendo assim os minerais de Mn associado ao minério de ferro indicam ambiência sedimentar, hidrotermal e restritamente intempérica, quando esses minerais em parte foram alterados, as soluções mobilizadas e então como novas fases foram reprecipitados ao lado dos oxi-hidróxidos de Fe.

A associação geoquímica típica quando da presença de minerais de manganês é Mn-As-Cu-Zn-Ag-ETR com teores anômalos positivos, enquanto para a formação ferrífera Zr-Hf-Nb-Ta-Sc-Th como valores negativos. Os elementos terras raras encontram-se em concentrações elevadas na zona enriquecida em Mn, mas principalmente quando se trata de hollandita, quando se observa forte anomalia positiva de Ce. O minério de Fe apresenta como característica anomalia positiva de Eu.

A contaminação por SiO_2 está representada por boulders métricos de jaspilitos circundados por hematitas friáveis, em muitos casos, quando a lavra atinge a zona saprolítica grossa.

Portanto os contaminantes de Mn são de origem diversa, porém predominam por enquanto as ocorrências hidrotermais, intimamente associadas com o proto-minério de ferro. Os teores elevados de SiO_2 mostram que a lavra atingiu a base do perfil de alteração, incorporando parte dos proto-minérios.

Palavras-chave: Oxi-hidróxidos e silicato de manganês; sílica; contaminantes, Formação Carajás.

ABSTRACT

Mineralogical characterization and control of manganese and silica contents in the Carajás mine iron ore is a routine task. Relatively high concentrations of manganese and silica minerals, considered ore impurities, are present in the high grade iron ore (>65% Fe) of the N5W mine. This study aimed to identify these minerals and their mode of occurrence in the iron ore from N5W, improving the mine planning and exploitation.

The main manganese minerals in the iron ore are: (a) pyrolusite, bixbyite, cryptomelane, hollandite, ramsdellite and chalcophanite, all Mn oxy-hydroxides; and (b) the braunite, a silicate. These minerals were found in hydrothermal veins and veinlets, cross-cutting the primary bedding of the iron ore and subordinately forming centimetre scale lens shaped veins, interbedded in the jaspilite layers. The Mn rich veins are spatially associated with fault zones and breccia bodies showing pyrolusite, chalcophanite, braunite and bixbyite veins, subordinated lenses of cryptomelane and hollandite. The presence of pyrolusite and cryptomelane indicates weathering of the rocks. Quartz and Fe-Mn oxy-hydroxides are the main minerals filling faults and fractures in the N5W mine, where MnO grades in veins, reach up to 61,74%.

The Mn minerals in the iron ore are indicative of sedimentary and hydrothermal origin. Weathering caused alteration of the primary minerals, promoting mobilization and reprecipitation of new Mn minerals together with Fe oxy-hydroxides.

Typical geochemical association in the Mn rich iron ore Mn-As-Cu-Zn-Ag with positive anomalous ETR levels, whilst in the iron formation Zr-Hf-Nb-Ta-Sc-Th with ETR negative values. The rare earth elements concentrations are higher in the Mn rich zones. These zones show strong positive Ce anomalies when hollandite is present.

Higher SiO₂ contents are related to the presence of metric jaspilite boulders surrounded by hematite friable, in the thick saprolite zone.

Finally, the Mn contaminants are diverse in origin, however hydrothermal Mn rich minerals are dominant, closely associated with the proto-iron ore. The high SiO₂ contents are indicative of the base of the alteration profile, incorporating part of the proto-ores.

Keywords: Mn Oxi-hydroxides; hematite; quartz; silica; contaminants, Carajás Formation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

- Figura 1** - Localização da mina N5W (delineada pelo quadrado), em Serra Norte – Carajás – PA, sobreposta à imagem Landsat 7 - RGB 457/1999..... 3
- Figura 2** - Mapa geológico regional da parte norte da PMC, atualizado pela Vale S.A. (Departamento de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos – DIPF / Departamento de Desenvolvimento de Projetos Mineraiis - DIPM) com base principal em DOCEGEO, 1988... 9
- Figura 3** - Imagem Ikonos obtida em 2012 da mina de ferro N5W, sobre a qual foram localizadas as amostras coletadas..... 13
- Figura 4** - Mapa litológico da mesma área da figura anterior, também com a localização das amostras coletadas. As siglas sobrepostas, iniciadas por MN indicam as amostras coletas contendo minerais de manganês associados ao minério de ferro, excetos as amostras MN-01 (basalto), MN-02 (gabro) e MN-03 (jaspilito)..... 14
- Figura 5** - (A) Frente de lavra de hematita friável (HF) a pulverulenta cinza escura; (B) Hematita friável com OH-Mn e quartzo friável (branco). A coloração cinza esverdeada ajuda na identificação das zonas com elevado teor de oxi-hidróxidos de manganês; (C) Hematita friável (HF) estratificada (estrutura reliquiar) com intercalação de material argiloso, destacado pela linha amarela; (D) Detalhe da hematita friável estratificada e internamente laminada cinza escura, rica em ferro ($Fe > 65\%$)..... 19
- Figura 6** - (A) Regularidade e diferentes espessuras das bandas com laminação interna plano-paralela, tanto nas bandas de jaspe (quartzo microcristalino + hematita criptocristalina) como nas bandas de óxidos de ferro (hematita semicompacta a compacta). (B) Estruturas esferoidais na superfície de bandas hematíticas do jaspilito preenchidas também por hematita e quartzo microcristalino..... 20
- Figura 7** - (A) Bolsão de jaspilito (delimitado pela linha branca) completamente envolvido por hematita friável (HF); (B) Outra exposição de bolsão de jaspilito dentro do corpo de minério a hematita friável (HF)..... 20
- Figura 8** – (A) Contato abrupto entre o minério de ferro (Formação Carajás) representado por hematita friável à esquerda e rocha máfica intemperizada (Formação Cigarra) à direita. Mina N5W. Altura da bancada: ~15 m. (B) Boulders de basalto na Formação Cigarra. 21
- Figura 9** - (A) Mapa litológico de N5W (Vale, 2013. Relatório interno). (B) Seção geológica vertical (SV_ – 1800).. 22

- Figura 10** - (A) jaspilito dobrado com eixo mergulhando para SW (250° Az/ 10°); (B) dobras em estilo “kink bands” na hematita friável; (C) Jaspilito muito fraturado; (D) zona de cisalhamento na hematita friável, onde se observa a laminação verticalizada do lado esquerdo e no lado direito apresenta um mergulho de aproximadamente 35° ; (E) Projeção estereográfica mostrando as principais direções de eixos de dobras e (F) Projeção estereográfica dos planos de fratura da mina de N5W, onde (1) representa todas as direções dos planos de (2) e (3) representam as duas principais direções destes planos de fratura.. 23
- Figura 11** - Mapa geofísico aerogravimétrico (FTG) da parte norte de Carajás mostrando os principais lineamentos estruturais sobre o grid da componente Tzz, realçando as estruturas NW-SE, NE-SW e N-S. A mina de ferro de N5W está delimitada em amarelo..... 24
- Figura 12** - Mapa geofísico aerogravimétrico da região da mina de N5W com a localização das amostras coletadas para análise química e identificação mineral (DRX e MEV).. 25
- Figura 13** - Dique de rocha vulcânica máfica intemperizado seccionando o minério de ferro com Oxi-hdróxidos de Mn associados. OH-FeMn: oxi-hidróxidos de ferro e manganês..... 26
- Figura 14** - Contato por falha entre a Formação Parauapebas (base) – lado direito da imagem e a Formação Carajás (topo) – lado esquerdo da imagem. Observa-se que a camada de hematita friável encontra-se completamente deformada e dobrada.. 26
- Figura 15** - (A) Basalto cloritizado constituído mineralogicamente por titanita (Ttn), clorita (Chl) e plagioclásio (Plg), visualização textural a nicóis paralelos. (B) Mesma fotomicrografia a nicóis cruzados..... 28
- Figura 16** - (A) Gabro constituído de plagioclásio (Plg), quartzo (Qtz), clorita (Chl), piroxênio (Px) e anfibólio (Anf) em nicóis paralelos. (B) Mesma fotomicrografia a nicóis cruzados..... 29
- Figura 17** - (A) Bandamento composicional ressaltado pelas bandas de óxidos de ferro e quartzo criptocristalino (chert). (B) Contato abrupto entre as bandas de óxidos de ferro e jaspe (quartzo criptocristalino com óxidos de Fe, principalmente hematita), além de lentes de quartzo microcristalino nas bandas de óxidos de Fe no jaspilito. Fotomicrografia de lâmina delgada..... 30
- Figura 18** – (A) Jaspilito compacto em frente de lavra da mina de N5W em contato com o minério a hematita friável; (B) Detalhe do jaspilito compacto mostrando bandas de quartzo microcristalino vermelho intercalado com bandas de óxidos de ferro cinza escura com porções boudinadas; (C) Fotomicrografia óptica mostrando relictos de cristais octaédricos de magnetita substituídos por carbonato 31

- Figura 19** - (A) Fotomicrografia de microesferulitos nas bandas de chert, mostrando um núcleo arredondado de hematita envolvido por quartzo microcristalino. Luz transmitida, nicóis cruzados. 32
- Figura 20** - (A) Micro a mesobandas de chert e óxidos de ferro em possíveis cristais octaédricos de ou seriam moldes de possíveis romboedros. (B) Detalhe do cristal de contorno romboédrico englobando os esferulitos ou possível octaedro. Luz transmitida, nicóis cruzados. 32
- Figura 21** - (A) Cristais de hematita, magnetita e quartzo. (B) Hematita (Hem) e criptomelana (MEV – Elétrons Retroespalhados (ERE)). (C) Jaspilito parcialmente intemperizado. (D) Detalhe da banda dominada por hematita, magnetita e, “martita” e além de quartzo do jaspilito da imagem C. 33
- Figura 22** - Fotomicrografias a partir de lâmina polida do minério de Fe. (A) Cristais isolados de hematita (Hem) com borda substituída parcialmente por goethita (Gth) e magnetita (Mag) por hematita (Hem). (B) Plasma de goethita envolvendo parte dos cristais de chert. (C) Cristal hexagonal de hematita com borda de goethita por substituição. (D) Cristal de magnetita substituído por hematita. 34
- Figura 23** - Mapa de isoteores (em %) de MnO e indicação das ocorrências de diques de rochas vulcânicas máficas na mina de N5W. 37
- Figura 24** - Minerais identificados por DRX: hematita (Hem); goethita (Gth); criptomelana (Cry); ramsdelita (Rdl); braunita (Bnt); bixbyita (Bxb); pirolusita (Pyr) e quartzo (Qtz) 38
- Figura 25** - (A) Visão geral da parte noroeste de N5W mostrando a zona de falha (faixa delimitada pelas linhas brancas) com oxi-hidróxidos de manganês e ferro. (B) Mapa litológico de N5W destacando a zona de falha com oxi-hidróxidos de Mn (C) Exposição de oxi-hidróxidos de Mn (ramsdelita, pirolusita e criptomelana) e hematita ao longo da zona de falha. OH-Mn: oxi-hidróxidos de Mn. 41
- Figura 26** - (A e B) Amostras de testemunho de sondagem (N5W-FD01429) com fraturas preenchidas por hidróxidos de Fe e Mn e quartzo nos jaspilitos. (C e D) Detalhe dos oxi-hidróxidos de Fe e Mn. (E) Oxi-hidróxidos de Fe e Mn e quartzo como vênulas alojadas em fraturas gabro, em que a vênula de quartzo transgride longitudinalmente o veio de dos hidróxidos de Fe e Mn 42
- Figura 27** - Fotomicrografias obtidas a partir de lâmina polida sob o microscópio ótico. (A) Massa de criptomelana (Cry) intercaladas com cristais prismáticos de pirolusita (Pyr). (B) Bandas concêntricas submilimétricas de hollandita (Hol) acicular intercaladas com cristais

- prismáticos de pirolusita (Pyr) e massa de criptomelana (Cry). (C) Massa de criptomelana seccionada por vênula de criptomelana, indicando mais de uma geração deste mineral. (D) Detalhe da vênula de criptomelana (Cry) e cristais de quartzo (Qtz) envoltos por uma massa de criptomelana..... 43
- Figura 28** - (A) Fotomicrografia (lâmina polida) mostrando a textura microcristalina da criptomelana (Cry) envolvendo os cristais lamelares de hematita (Hem). (B) Detalhe da textura microcristalina da matriz de criptomelana (Cry) envolvendo os cristais lamelares ou tabulares de hematita (Hem)..... 44
- Figura 29** - Fotomicrografia (lâmina polida) em que cristais tabulares radiais de hematita (Hem) estão envoltos por massa de criptomelana (Cry) e braunita (Bra). 45
- Figura 30** - (A e B) Cristais de pirolusita tabular com seu espectro analítico obtido com MEV/EED, elétrons retroespalhados; (C) Agregados tabulares de pirolusita (Pyr) com hollandita (Hol) (indicada pelas setas brancas). MEV, elétrons retroespalhados; (D) Fotomicrografia de cristais de pirolusita (Pyr), hollandita (Hol) e braunita (Bra), fraturadas.....46
- Figura 31** - (A) Micrografias mostrando massas de criptomelana (Cry) e cristais prismáticos tabulares de pirolusita (Pyr). (B) Cristalitos em hábito acicular de criptomelana (Cry) e pirolusita (Pyr) intercrescidos em treliça. (C) Massas de criptomelana (Cry) seccionadas por vênulas de criptomelana (Cry). (D) Criptomelana microcristalina seccionada por vênulas de mesma composição. MEV, elétrons retroespalhados.. 47
- Figura 32** – Vênula de pirolusita (Pyr) seccionando cristais microcristalinos de hollandita (Hol). (C) e (D) Hollandita acicular em contato com cristais tabulares de pirolusita e seu respectivo espectro analítico obtido com MEV/EED. MEV, elétrons retroespalhados. 48
- Figura 33** – (A) Criptomelana (Cry) criptocristalina com cristais lamelares de hematita (Hem). (B) Agregados de criptomelana com hematita lamelar. MEV, elétrons retroespalhados.49
- Figura 34** - (A) Magnetita (Mag) em raros cristais octaédricos e hematita (Hem) prismática hexagonal. (B) cristais de hematita lamelar intercrescida com quartzo. MEV, elétrons retroespalhados 49
- Figura 35** – (A) Cristais octaédricos de magnetita (Mag) “maritizada” envoltos por hematita (Hem) lamelar muito fina e quartzo (Qtz). (B) Detalhe da imagem anterior. MEV, elétrons retroespalhados. 50

Figura 36 - Goethita (Gth) substituindo magnetita (Mag) e seu respectivo espectro analítico obtido com MEV/EED. MEV, eletros retroespalhados. A composição sugere a presença de oxi-hidróxidos de Mn e quartzo (Qtz)	50
Figura 37 - Diagramas ternário para as concentrações Fe_2O_3 - SiO_2 -MnO para as amostras de N5W.	57
Figura 38 - Diagramas de dispersão para os pares de elementos químicos MnO em relação a Fe_2O_3 e SiO_2 em relação a Fe_2O_3	58
Figura 39 - Dendrograma de similaridade das amostras com base nas análises químicas multi-elementares na mina de ferro de N5W.	58
Figura 40 - Diagramas de dispersão química nas amostras da mina N5W	60
Figura 41 - Concentrações dos ETR das amostras de N5W, com anomalias de Ce normalizados aos condritos (Evesen et. al.,1978)..	62
Figura 42 – Mapa de isoteor de MnO sobreposto à geologia da mina N5W..	63
Figura 43 – Mapas de distribuição de isoteores de Fe_2O_3 , MnO, SiO_2 , P_2O_5 , Cu, Sr, Pb e Zn na área da mina N5W... ..	64
Figura 44 – Mapas de distribuição de isoteores de Ba e Ce na área da mina N5W.....	65

TABELAS

Tabela 1 – Localização geográfica das amostras investigadas.....	15
Tabela 2 - Principais minerais identificados nas amostras de minério de ferro e de manganês associados aqui investigadas..	39
Tabela 3 - Principais minerais de manganês identificados em N5W e sua relação genética..	52
Tabela 4 - Resultados das análises químicas das amostras investigadas, tanto para os elementos maiores (como óxidos), menores e traços...	55

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO	iv
RUSUMO	v
ABSTRACT	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 JUSTIFICATIVAS	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 Objetivo Geral	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	3
3 FISIOGRAFIA	4
3.1. MORFOLOGIA	4
3.2 CLIMA.....	5
3.3 VEGETAÇÃO.....	5
4 GEOLOGIA REGIONAL	7
4.1 PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS (PMC).....	7
4.1.1 Arcabouço Tectônico	10
4.1.2 Gênese do Minério de Ferro	11
5 MATERIAIS E MÉTODOS	12
5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E TRABALHOS DE CAMPO.....	12
5.2 AMOSTRAGEM E MATERIAL.....	12
5.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TEXTURAL POR MICROSCOPIA ÓPTICA.....	16
5.4 IDENTIFICAÇÃO MINERAL POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).....	16
5.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	16
5.6 ANÁLISES QUÍMICAS TOTAIS.....	17

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
6.1 GEOLOGIA DA MINA N5W	18
6.1.1 Petrografia	28
6.1.1.1 Basaltos.....	28
6.1.1.2 Gabros.....	29
6.1.1.3 Jaspilitos.....	30
6.1.1.4 Jaspilitos Intemperizados.....	33
6.1.1.5 O Minério de Ferro e Canga.....	34
6.2 MINERALOGIA E MODO DE OCORRÊNCIA DOS MINERAIS DE MANGANÊS E FERRO	36
6.2.1 Variações texturais e mineralógicas de veios representativos de OH-Mn e OH-Fe	43
6.2.1.1 Veio 1.....	43
6.2.1.2 Veio 2.....	44
6.2.1.3 Veio 3.....	44
6.2.2 Minerais Oxi-hidróxidos de Manganês	46
6.2.2.1 Pirolusita.....	46
6.2.2.2 Criptomelana.....	47
6.2.2.3 Hollandita.....	48
6.2.3 Minerais Oxi-hidróxidos de Ferro	49
6.2.3.1 Hematita.....	49
6.2.3.2 Magnetita.....	49
6.2.3.3 Goethita.....	50
6.3 INTERPRETAÇÕES AMBIENTAIS A PARTIR DOS OXI-HIDRÓXIDOS DE Fe E Mn ASSOCIADOS.....	51
6.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	53
6.4.1 Elementos Maiores	53
6.4.2 Elementos Traços	59
6.5 DISTRIBUIÇÃO AREAL DOS ELEMENTOS QUÍMICOS.....	63
7 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

As jazidas de minério de ferro da Província Mineral de Carajás (PMC) foram descobertas em 1967 e são lavradas desde 1985 nas minas da Serra Norte, com previsão para breve lavra em Serra Sul. O minério é constituído principalmente por hematita friável e compacta. O corpo de minério apresenta no topo crostas ferruginosas cavernosas, conhecidas mais comumente pelos geólogos de Carajás como cangas de minério. Essas crostas representam parte do perfil laterítico derivados dos jaspilitos da Formação Carajás, do Grupo Grão-Pará (Beisiegel et al., 1973); Costa (1997) e Costa (2006). A mina de N5W, localizada em Serra Norte é constituída de minério de alto teor (acima de 65% de Fe), mas apesar da excelente qualidade do minério, localmente o mesmo alcança teores relativamente elevados, atingindo até 11,65% de MnO, 14,35% de SiO₂, com menor proporção de P₂O₅ (0,85%) e Al₂O₃ (10,45%), e por isso considerados como contaminantes. Com este trabalho pretende-se identificar o modo de ocorrência dos minerais contaminantes do minério de ferro, sua constituição mineralógica e sua relação com a origem do minério, na tentativa de minimizar seu impacto durante a operação de lavra do minério de ferro da mina de N5W, em Carajás – PA.

Manganês associado a minério de ferro ocorre em diversas partes do mundo, a exemplo da mina de Urucum, em Corumbá (Brasil) e no Egito (Bahariya Oasis). Ambos os casos o Mn está associado a camadas depositadas intercaladas ao minério de ferro. Na mina de N5W, em Carajás-PA, não há camadas de Mn significativas para viabilizar um depósito mineral. Entretanto, em várias partes da mina ocorrem oxi-hidróxidos de Mn em planos de falhas e fraturas, sendo estas zonas as principais responsáveis pelo elevado teor de manganês nesta mina.

Dados geoquímicos mostram, em termos de elementos maiores, que Fe₂O₃, MnO e SiO₂ apresentam teores mais elevados. Enquanto que CaO, MgO, Na₂O₃, P₂O₅ e TiO₂ valores relativamente baixo quando comparados à média crustal (MC) segundo Wedephl (1995).

Os principais minerais de manganês identificados foram pirolusita, bixbyita, criptomelana, hollandita, braunita, ramsdellita e calcofanita, todos oxi-hidróxidos de Mn, exceto a braunita, que é um silicato. Estes minerais geralmente estão alojados em veios e vênulas hidrotermais que interceptam o minério de ferro. Mas ocorrências, em menor proporção, entre as camadas do minério de ferro e jaspilito também são observadas, como

aparente ligação com pequenas lentes. Sendo assim, a principal forma de ocorrência de minerais de Mn associado ao minério de ferro estaria relacionada a processos hidrotermais e intempéricos.

Técnicas de difração de raios-X, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e sistema de energia dispersiva (MEV/SED), além de análises químicas foram utilizadas para identificação mineral dos oxi-hidróxidos de manganês (OH-Mn).

1.2 JUSTIFICATIVAS

A mina de N5W é constituída de minério de alto teor (acima de 65% de Fe), mas apesar do excelente teor de Fe, localmente o minério alcança teores relativamente elevados de manganês (OH-Mn) e sílica, principalmente, e por isso são considerados como contaminantes do minério de ferro a hematita friável. Com este trabalho pretende-se identificar o modo de ocorrência dos minerais contaminantes (OH-Mn e quartzo, este conhecido genericamente por sílica) do minério de ferro e sua relação com a origem do minério, na tentativa de minimizar seu impacto durante a operação de lavra do minério de ferro da mina de N5W.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho objetiva identificar o modo de ocorrência dos minerais contaminantes do minério de ferro, sua constituição mineralógica e sua relação genética com o minério, tendo como exemplo a mina de ferro N5W, na tentativa de minimizar seu impacto durante a operação de lavra do minério de ferro.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos dessa dissertação foram:

Definir o modo de ocorrência dos oxi-hidróxidos de manganês e de sílica na mina de N5W;

Caracterizar a assembleia mineralógica dos oxi-hidróxidos de manganês;

Determinar a composição química das áreas com elevado teor de MnO e suas variações na mina de N5W.

2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A Província Mineral de Carajás (PMC), região onde se insere a mina de N5W, localiza-se no sudeste do Pará e é parcialmente englobada pela Floresta Nacional de Carajás (FLONACA). A Serra dos Carajás se estende por aproximadamente 350 km na direção Leste-Oeste, abrangendo parte dos municípios de Marabá, Parauapebas, Eldorado dos Carajás e São Félix do Xingu.

A mina de N5W, em plena operação de lavra, posiciona-se no conjunto de elevações de topo relativamente aplainado que compõem parte da Serra Norte, no sudeste do Pará, e dista 45 km da cidade de Parauapebas (Figura 1). A Serra Norte está dentro da Floresta Nacional de Carajás (FLONACA).

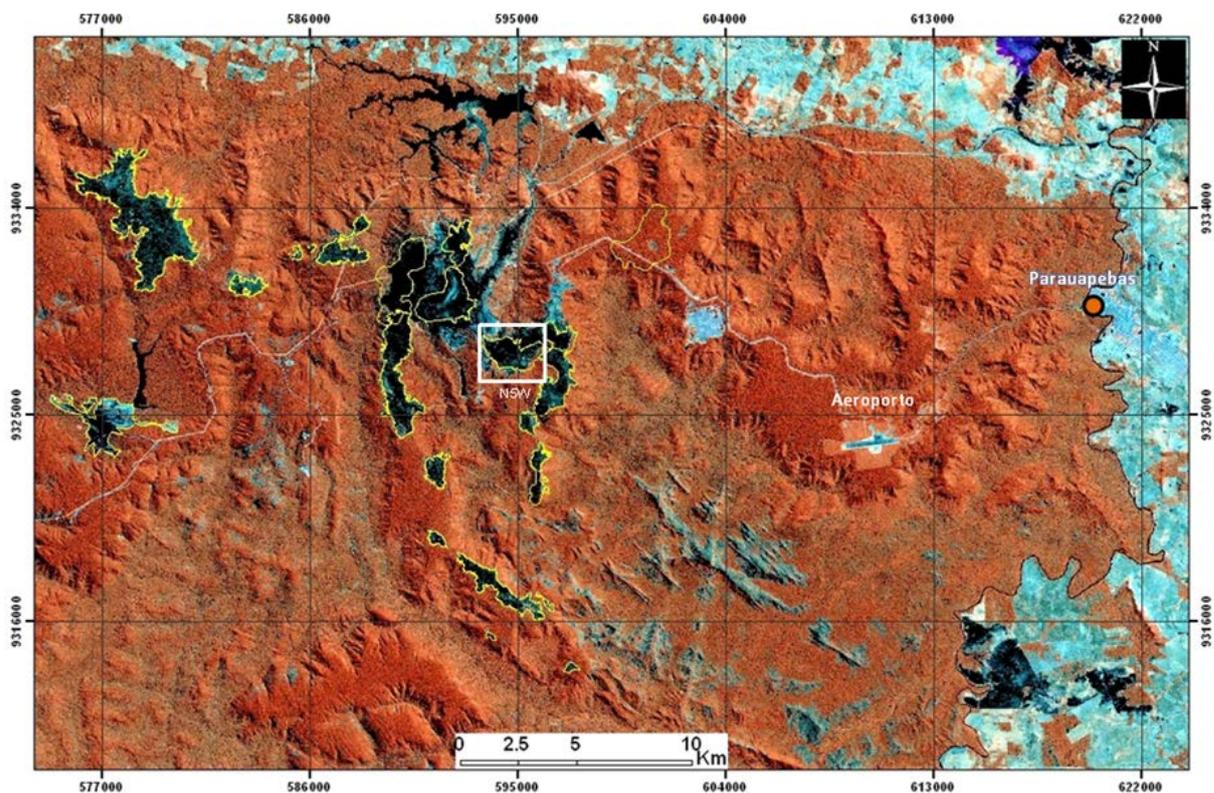


Figura 1 - Localização da mina N5W (delineada pelo quadrado), em Serra Norte – Carajás – PA, sobreposta à imagem Landsat 7 - RGB 457/1999.

3 FISIOGRAFIA

3.1. MORFOLOGIA

Segundo Ab'Sáber (1986) a geomorfologia da área oriental da Amazônia, onde está localizada a mina de N5W, é toda ela constituída por grandes extensões de terras baixas colinosas – tabuleiros, baixos platôs, relevos cuestiformes, colinas ligeiramente mamelonares situadas em terrenos antigos – até 600-800 km para o interior, onde a Serra dos Carajás quebra a monotonia relativa das terras baixas, salientando-se na paisagem como restos de antigos divisores dissecados, situados entre os vales do Araguaia e o Xingu. Ainda segundo este autor a Província Mineral de Carajás (PMC), na região sudeste do Pará, é constituída por duas unidades geomorfológicas de expressão regional: o *Planalto do Sul do Pará* e a *Depressão Periférica do Sul do Pará*.

O Planalto Dissecado do Sul do Pará é caracterizado por maciços residuais de topo aplainado e conjunto de cristas e picos com altitudes, em geral, entre 500 e 600 metros, atingindo nos trechos mais elevados altitudes entre 600 a 880 metros. Interpenetram esses terrenos os vales encaixados gerados por intenso processo de dissecção, condicionados por falhas e fraturas em combinação com diferentes litologias. Nesse domínio, os topos aplainados são testemunhos da Superfície Sul-Americana, desenvolvida entre o Cretáceo e o Terciário Superior. Na Serra dos Carajás, além dos residuais de relevo plano com espessas coberturas pedológicas, ainda se incluem neste compartimento os relevos cimeiros sustentados por formações ferríferas e cangas lateríticas ferruginosas, cuja identificação é facilmente percebida dada à especificidade da fisionomia savânica da vegetação que estes relevos comportam.

A depressão Periférica do Sul do Pará compreende uma faixa de terrenos rebaixados situada na periferia das bacias paleozoicas do Piauí-Maranhão e do Amazonas, que envolve parcialmente o Planalto Dissecado do Sul do Pará, e inclui zonas rebaixadas e dissecadas além de áreas colinosas revestidas de florestas densas, situadas em cotas abaixo dos 350 metros e cujo nível de base local pode ser modelado por rios como o Itacaiúnas e Parauapebas, em cotas em torno dos 165 a 150 metros. Possui como geoformas dominantes colinas e morros rebaixados, conformando vales abertos modelados em rochas predominantemente associadas ao Complexo Cristalino.

3.2 CLIMA

A Floresta Nacional de Carajás apresenta clima tropical chuvoso. A umidade tem importância na manutenção do equilíbrio hidrológico, climático, ecológico e edáfico do complexo da Serra dos Carajás, como parte do Sistema Hidrográfico Araguaia-Tocantins. A precipitação flutua entre 2.000 e 2.400mm anuais. A temperatura média anual está em torno de 23°C a 25°C, com o período mais quente do ano ocorrendo de julho a setembro. A umidade relativa média do ar está em torno de 80% (ICMbio, 2014). O clima da região, na classificação de Köppen, é equatorial super-úmido tipo Am, na transição para tipo Aw (IBGE 1989). O período chuvoso inicia-se em outubro e atinge o máximo no período de janeiro a março, terminando em maio.

Por se tratar de terrenos íngremes, com desníveis de mais de 500 metros, observam-se fenômenos localizados como o aumento excessivo da umidade relativa do ar nas primeiras horas do dia acompanhado da formação de neblina e aumento de temperatura. Ou mesmo, ao nível dos sopés das serras, com exuberante cobertura vegetal, onde as temperaturas são mais amenas do que nas demais áreas de condições fisiográficas distintas.

3.3 VEGETAÇÃO

Em termos de cobertura vegetal, mais de 95% da Flona de Carajás é coberta por florestas, sejam elas ombrófilas ou estacionais. Dos 5% restantes, cerca de metade é formada por vegetação herbácea ou arbustiva que ocorre sobre carapaças lateríticas (canga) em áreas isoladas nas partes mais altas dos trechos norte e sul da Serra dos Carajás, representando uma peculiaridade da região (Campos & Castilho, 2012).

Segundo o diagnóstico apresentado pelo Plano de Manejo da Flona de Carajás, duas principais fitofisionomias florestais foram identificadas: floresta do tipo Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Aberta (Campos & Castilho, 2012).

Floresta ombrófila aberta é uma formação menos homogênea da floresta hidrófila, com alternância de matas densas e abertas, de mediana biomassa e que ocorrem em terrenos cujo relevo é acidentado. É também conhecida como mata de cipós.

Apresenta-se como uma vegetação florestada aberta, em que entre muitas outras espécies se destaca castanha do Pará (*Bertholletia* sp.), em alta densidade, inteiramente cobertas e dominadas por lianas, trepadeiras, cipós e também, variedades de palmeiras, principalmente naquelas áreas que já sofreram algum tipo de desmate ou derrubada ou mesmo em zonas de clareiras naturais.

Floresta ombrófila densa de submontana, densa e alta, com elevada biomassa, se entende desde a Serra do Carajás até a região de Serra Pelada (Golfari, 1980). Entre os gêneros mais importantes destacam-se as variedades “de lei” tais como *Cedrelinga* (cedrorana), *Astronium* (aroeira, muiracatiara) e *Copaifera* (copaíba), além do cinzeiro (*Erisma uncinatum*) e quaruba (*Vochizia maxima*).

Na Flona de Carajás encontram-se as principais áreas de vegetação rupestre sobre canga da região, que se trata de um ecossistema singular, de reconhecido endemismo e que se encontra preferencialmente vinculado aos domínios das rochas ferríferas (Campos & Castilho, 2012).

Trabalhos recentes (Golder, 2009 *Apud* Campos & Castilho, 2012) mostraram que formações savânicas também ocorrem sobre outras litologias, porém sempre associadas aos substratos rochosos “*in situ*” ou à própria canga laterítica desenvolvida sobre outro tipo de rocha.

4 GEOLOGIA REGIONAL

4.1 PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS (PMC)

A PMC está situada na região leste-sudeste do estado do Pará, limitada a leste pelos rios Araguaia-Tocantins, oeste pelo rio Xingu, norte pela Serra do Bacajá e a sul pela Serra dos Gradaús (DOCEGEO, 1988). Esta província encontra-se sob o domínio do Cráton Amazônico, especificamente, na província geocronológica Amazônia Central de Tassinari & Macambira (1999), que corresponde ao seu núcleo arqueano com dois domínios: ao sul, com terrenos granito-*greenstone* de Rio Maria (Dall’Agnol et al., 1996) e ao norte o Cinturão Itacaiúnas (Araújo et al., 1988). A PMC apresenta idade predominantemente Arqueana, sendo caracterizada por uma estruturação WNW-ESSE. Os terrenos arqueanos compreendem dois domínios: Rio Maria (Mesoarqueano) e Carajás (Neoarqueano).

O domínio Rio Maria, localizado a sul do Domínio Carajás, é constituído essencialmente por terrenos tipo granitóide-*greenstone*. Os terrenos granito-*greenstone* de Rio Maria (3,05 – 2,85Ga) compreendem o *Greenstone Belt* Andorinhas (DOCEGEO, 1988) e as intrusões graníticas (Granodiorito Rio Maria, Trondhjemitó Mogno e Tonalito Parazônia).

O Domínio Carajás apesar de apresentar rochas mesoarqueanas como os complexos Xingu e Pium (2,86 e 3,00 Ga, respectivamente) é caracterizado por sequências vulcanossedimentares e granitóides gerados no intervalo de 2,76 a 2,55 Ga. O Cinturão Itacaiúnas envolve os complexos Xingu (Silva et al., 1974) e Pium (Araújo et al., 1988; DOCEGEO, 1988), o Gnaisse Estrela, a Suíte Plaqué e os grupos Sapucaia e Grão-Pará, este contendo a formação Carajás, portadora dos protominérios de ferro, os jaspilitos.

Os terrenos da PMC foram atingidos pelo Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, formado ao norte, pelos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento e, ao sul destes até a região de Rio Maria por um domínio imbricado (Araújo et al., 1988) e Araújo & Maia (1991), com o desenvolvimento de um sigmóide alongado na direção WNW-ESSE, onde se situam as serras norte e sul, mineralizadas em minério de ferro. O Sistema Transcorrente cinzento é caracterizado por um feixe de falhas curvas e anostomóticas, com direção WNW-ESE, possuindo como principais feições o sidewall ripout do Salobo, o romboedro do Cururu e o splay de Serra Pelada (Pinheiro, 1997). O Sistema Transcorrente Carajás é marcado pela estrutura sigmoidal de Carajás (Pinheiro, 1997). Seccionando esta feição longitudinalmente tem-se a Falha Carajás que representa a estrutura mais proeminente desse sistema.

Beisiegel et al. (1973) dividem o Grupo Grão-Pará em duas seqüências paleovulcânicas, inferior e superior, separadas pela Formação Carajás. A Sequência Paleovulcânica Inferior, correspondente à como Formação Parauapebas, é representada por rochas vulcânicas máficas, hidrotermalmente alteradas e com feições primárias preservadas, tais como amígdalas e textura intergranular. A Sequência Paleovulcânica Superior, correspondente à Formação Igarapé Cigarra proposta inicialmente por Macambira et al. (1990), é constituída por rochas vulcânicas básicas semelhantes àquelas da Sequência Paleovulcânica Inferior, com intercalações de tufos, sedimentos clásticos e químicos (Macambira, 2003). A participação dessa formação no Grupo Grão-Pará não é unanimidade entre os autores. Por exemplo, Teixeira (1994) e Teixeira et al. (1997) associam essa unidade ao Grupo Igarapé Bahia, posicionado acima do Grupo Grão-Pará. A Formação Carajás é composta de formações ferríferas bandadas (jaspilitos), minérios de ferro e seus produtos de alteração (Meirelles, 1986; Lindenmayer et al., 2001; Klein & Ladeira, 2002; Figueiredo e Silva, 2004).

A Formação Águas Claras corresponde a um pacote siliciclástico com cerca de 1500 metros de espessura, dividida em dois membros (inferior e superior) com base na razão arenito/pelito (Nogueira, 1995). O Membro superior é representado por arenitos e conglomerados de origem fluvial e litorânea de águas rasas, enquanto que o membro inferior é composto por siltitos e argilitos apresentando estruturas típicas de plataforma marinha. A presença de fácies geradas por tempestades e, principalmente, por marés sugere que existiram áreas bem maiores que a parte atualmente preservada da bacia de Carajás e que a Bacia Carajás teria tido uma ampla comunicação com áreas oceânicas (Nogueira, 1995). Pinheiro (1997) sugere que essas rochas tenham sido depositadas em plataforma marinha afetadas por tempestades. Corpos gabróicos que cortam esta formação foram datados em 2.4 Ga, representando uma idade mínima para a Formação Águas Claras (Dias et al., 1996).

Manifestações manganésíferas na PMC são expressivas ao nível de jazidas, exemplificada pela mina do Azul, em que o minério está associado com pelitos e siltitos manganésíferos, os quais foram parcialmente enriquecidos pelo intemperismo paleotropical, da mesma forma como o minério de ferro (Costa et al., 2006). Ainda, segundo Costa et al. (2006) três frentes de lavra desta mina encontram-se sobre paisagem laterítica típica, correspondendo a um perfil laterítico maturo, completo a truncado pela erosão, cuja profundidade não atinge 100m, além de minério primário sedimentar. A Mina do Azul é dividida em dois blocos separados por falha normal com rejeitos de até dezenas de metros, com o bloco norte alto em relação ao bloco sul (Silva, 2006).

O Granito Estrela é o mais antigo (2.763 ± 7 Ma, Barros et al., 2001), enquanto os granitos Planalto e Serra do Rabo representam plutonismo em torno de 20 Ma mais jovem. Apesar da incerteza acerca da idade do Granito Plaquê (2.736 ± 24 Ma, Avelar et al., 1999) a idade do mesmo é associada à dos granitóides Planalto, Estrela e Serra do Rabo. O Diorito Cristalino com idade de 2.738 ± 6 Ma (Huhn et al., 1999), também está temporalmente associado a essa granitogênese e caracterizado por uma associação cálcio-alcálica bimodal de arco continental.

A Figura 2 mostra o mapa geológico da parte norte de Carajás.

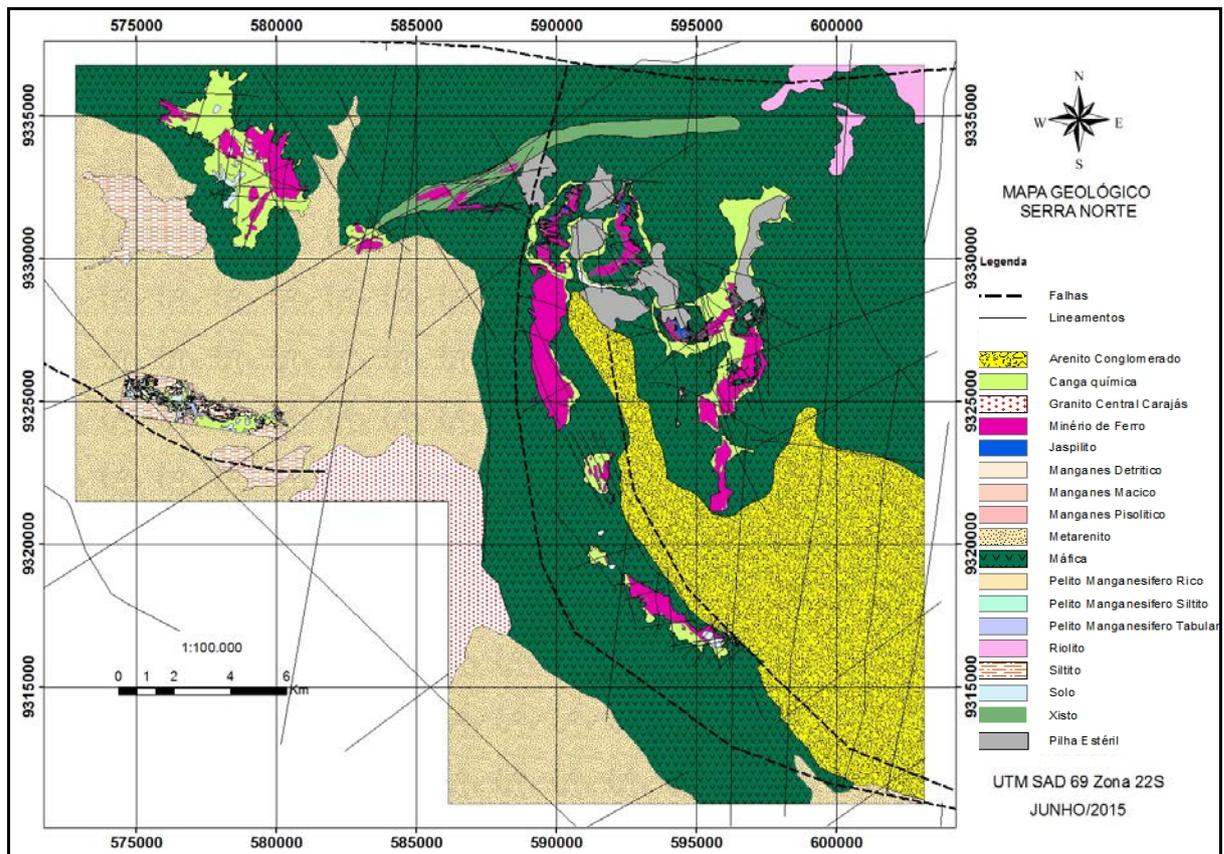


Figura 2 - Mapa geológico regional da parte norte da PMC, atualizado pela Vale S.A. (Departamento de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos – DIPF / Departamento de Desenvolvimento de Projetos Mineraiis - DIPM) com base principal em DOCEGEO, 1988.

4.1.1 Arcabouço Tectônico

A estrutura geral da região da Serra dos Carajás foi originalmente descrita como um sinclínório falhado de eixo WNW-ESE, cujos flancos eram constituídos pelas formações ferríferas intercaladas por rochas vulcânicas máficas (Resende et al., 1972; Beisiegel et al., 1973).

Araújo et al. (1988) e Araújo e Maia (1991) definem como principal estrutura da PMC o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas. De orientação geral E-W, esse cinturão seria formado, na porção norte, pelos sistemas transcorrentes Serra dos Carajás e Cinzento e, na porção sul, por um domínio imbricado. O sistema Serra dos Carajás, que envolve principalmente as rochas do Grupo Grão-Pará, corresponderia a um grande sigmóide alongado na direção WNW-ESE e limitado pelas serras Norte e Sul. A sua estrutura interna é interpretada pelos autores como uma flor positiva, produzida por um binário cisalhante sinistral. O Sistema Cinzento, que afeta rochas do Grupo Rio Novo, do Complexo Xingu e do Gnaisse Estrela, abarca os corpos de minério de ferro das Serra Norte (denominados N1 a N9 Serra Norte) e Leste. O domínio imbricado, que se estende da borda sul da Serra dos Carajás até a região de passagem para o terreno granito-*greenstone* Rio Maria, desenvolveu-se sobre rochas do Complexo Xingu, granitóides isolados e lentes de supracrustais.

Pinheiro (1997) propõe para a região da PMC uma evolução tectônica que se inicia com a ação de um regime transpressivo sinistral dúctil afetando o embasamento na chamada Zona de Cisalhamento Itacaiúnas por volta de 2.8Ga. Posteriormente, a região teria sido submetida a um segundo evento transpressivo sinistral, que ocasionou a deformação e o metamorfismo das rochas do Grupo Igarapé Pojuca. Uma extensa bacia intracratônica é formada por volta de 2.7Ga, onde teria lugar à deposição e vulcanismo registrados pelo Grupo Grão-Pará. Por volta de 2.6Ga um tectonismo transtrativo dextral afetaria todas as unidades e levaria ao desenvolvimento dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, além da nucleação da Falha Carajás. No Proterozóico Inferior (entre 2.6 e 1.9Ga), uma reativação transpressiva sinistral da Falha Carajás propiciaria a inversão parcial do sistema.

Segundo Rosière et al. (2005), uma análise das estruturas em macro e meso-escalas da região da PMC indica uma superposição de eventos. Tomando por base dados até então existentes, investigação estrutural de detalhe e regional, fundamentada em sensoriamento remoto, postulam que a estrutura geral da província consiste de um conjunto de dobras regionais de traço axial WNW-ESSE, truncadas por zonas de cisalhamento rúptil-dúcteis regionais, que interferem com plútons e domos graníticos.

4.1.2 Gênese do Minério de Ferro

A origem dos minérios de ferro da PMC ainda é pouco conhecida e investigada. O minério hematítico rico foi reconhecido como intempérico primeiramente por Tolbert et al. (1971) e por Beisiegel et al. (1973) que admitiram origem tanto intempérica como hidrotermal. Beisiegel (1982) propôs enriquecimento supergênico a partir dos jaspilitos da Formação Carajás, causada pela lixiviação preferencial da sílica, onde elevou os teores de ferro de 36-45% para 64-68%. Uma origem supergênica para o minério de ferro também é defendida por Dardenne e Schobbenhaus (2001). Mais recentemente a evolução laterítica é defendida por Costa (1997) e Costa et al. (2011) na mina N8. Estudos de Lindenmayer et al., 2001; Lobato et al. (2005); Figueiredo e Silva et al. (2008); Figueiredo e Silva (2009); Grainger et al. (2009) concluíram que os distintos minérios de ferro seriam fundamentalmente de origem hidrotermal. A atuação de fluidos hidrotermais como responsáveis pelas mineralizações de ferro também é postulada por Rosière et al. (2004, 2005) e Lobato et al. (2005a, 2005b). Para Rosière et al. (2004, 2005), existe ainda um controle estrutural nessas mineralizações, visto que os grandes corpos desenvolveram-se em zonas de maior permeabilidade, ou seja, na zona de charneira do antiformal de Carajás.

Pelo exposto a presença de Mn no minério de ferro em suas principais minas em Carajás ainda não foi motivo de pesquisa, exceto a citação de Suszczyński (1972). Quando assim admitida foi relacionada ao ambiente da mina de Mn do Azul. Medeiros Filho et al. (1994) mostra o significado das manifestações de manganês e alumínio nos minérios de ferro na parte norte do depósito de N4W, onde os autores atribuem um forte controle estrutural associados às zonas tectonicamente perturbadas como falhas, cisalhamentos, contatos tectônicos ou diques máficos.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E TRABALHOS DE CAMPO

Inicialmente foi feita pesquisa bibliográfica visando um melhor entendimento sobre as ocorrências de minério de ferro associado com oxi-hidróxidos de manganês. Durante a pesquisa bibliográfica foram consultados relatórios técnicos, publicações de artigos técnico-científicos e livros, tanto físico como no banco de dados de Periódicos da Capes (on line).

Em paralelo e na fase inicial realizaram-se os trabalhos de campo que consistiram de estudos geológicos de detalhe em frentes de lavra na mina de N5W e paralelamente em descrições de testemunhos de sondagem na casa de testemunho visando definir zonas com oxi-hidróxidos de manganês e as relações de campo entre eles e o minério de ferro, tendo como base as informações prévias de logs de campo, seções geológicas, descrição de furos de sondagem e banco de dados de análises químicas de interesse da lavra. Paralelamente foi realizada a amostragem para realização das diferentes análises descritas a seguir.

5.2 AMOSTRAGEM E MATERIAIS

Foram coletadas 35 amostras na frente de lavra e em furos de sondagem realizados na mina N5W (Figura 3) (Tabela1). Destas 29 foram direcionadas para análise química total, das quais se selecionou 9 para lâmina polidas. Em 23 delas foram realizadas análises mineralógicas por difração de Raios-X (DRX).

A amostragem foi dirigida ao minério de ferro com presença de oxi-hidróxidos de manganês ao longo de contato com corpos de rochas vulcânicas máficas, zonas de falhas e fraturas e ao longo de veios e vênulas de oxi-hidróxidos de Mn. Sempre quando possível se tentou coletar nas canaletas de 1 metro de extensão e 5 cm de profundidade. A amostragem ocorreu tanto no corpo de minério das frentes de lavra da mina de N5W como em caixas de testemunho de sondagens.

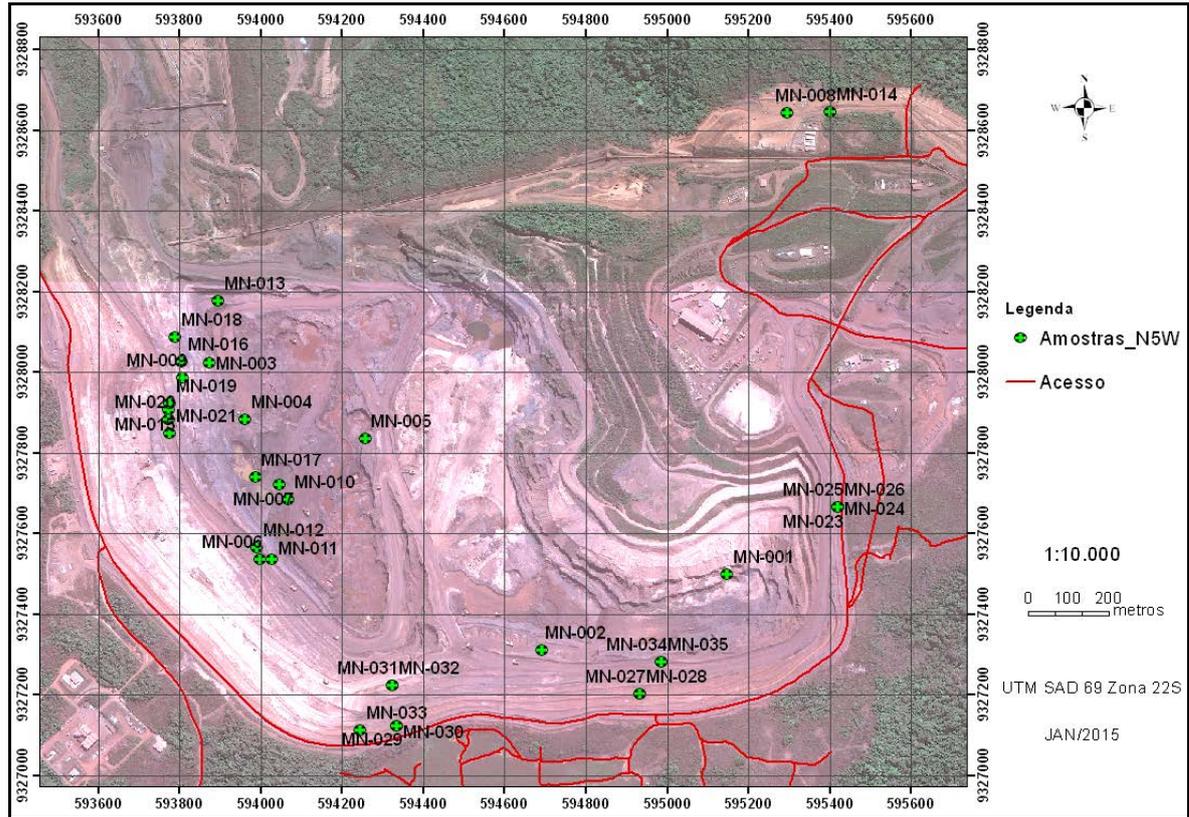


Figura 3 – Imagem Ikonos obtida em 2012 da mina de ferro N5W, sobre a qual foram localizadas as amostras coletadas.

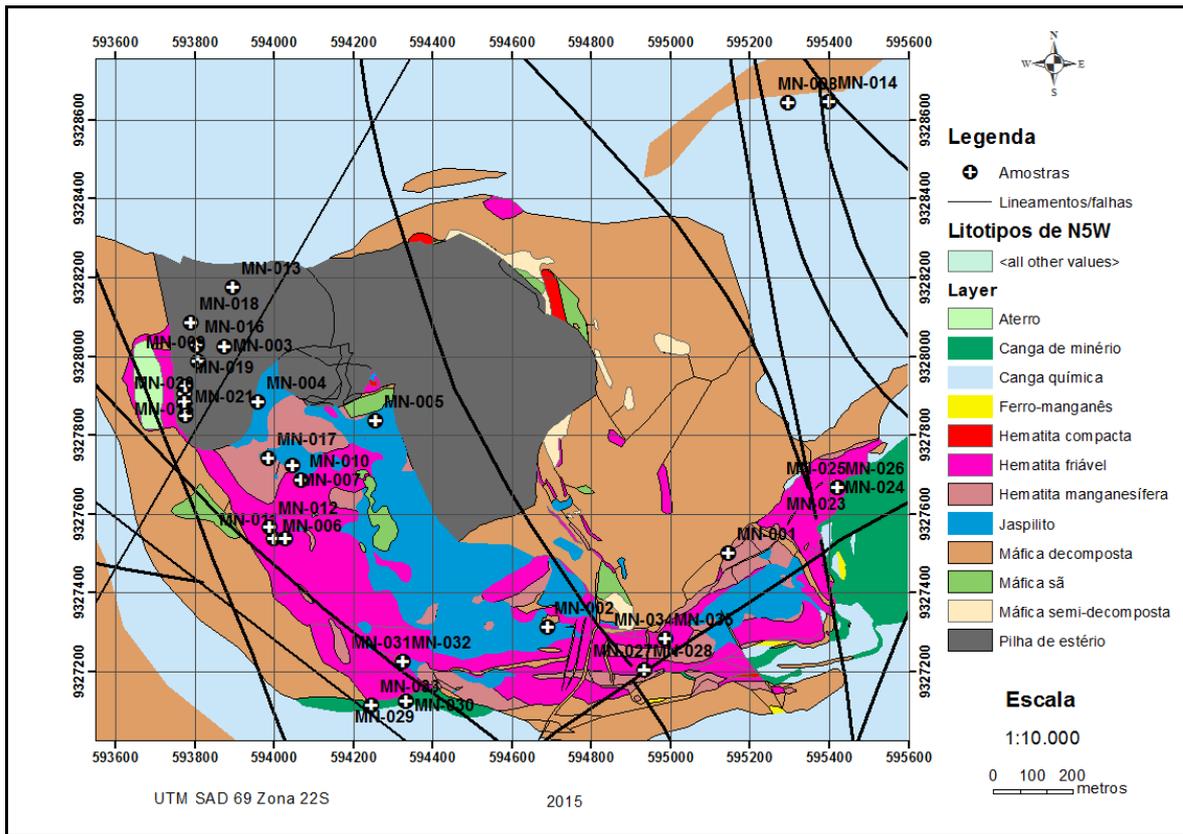


Figura 4 – Mapa litológico da mesma área da figura anterior, também com a localização das amostras coletadas. As siglas sobrepostas, iniciadas por MN indicam as amostras coletas contendo minerais de manganês associados ao minério de ferro, excetos as amostras MN-01 (basalto), MN-02 (gabro) e MN-03 (jaspilito).

Tabela 1 – Localização geográfica das amostras investigadas.

Código da empresa	Código de trabalho	Coordenadas		
		X	Y	Z (m)
N5W-LCC-00001	MN-001	9327500	595147	622
N5W-LCC-00002	MN-002	9327314	594691	598
N5W-LCC-00006	MN-003	9328025	593875	549
N5W-LCC-00008	MN-004	9327885	593961	545
N5W-LCC-00020	MN-005	9327837	594257	541
N5W-LCC-00023	MN-006	9327537	593999	529
N5W-LCC-00032	MN-007	9327722	594047	519
N5W-FD01386	MN-008	9328645	595296	661
N5W-LCC-00014	MN-009	9327989	593809	460
N5W-LCC-00033	MN-010	9327686	594068	522
N5W-LCC-00042	MN-011	9327538	594028	513
N5W-LCC-00025	MN-012	9327568	593990	525
N5W-LCC-00019	MN-013	9328177	593896	544
N5W-FD01388	MN-014	9328646	595401	665
N5W-LCC-00016	MN-015	9327907	593774	554
N5W-LCC-00012	MN-016	9328027	593805	536
N5W-LCC-00024	MN-017	9327741	593987	511
N5W-LCC-00011	MN-018	9328087	593790	542
N5W-LCC-00015	MN-019	9327924	593776	557
N5W-LCC-00017	MN-020	9327885	593775	554
N5W-LCC-00018	MN-021	9327851	593776	552
N5W-FR01345	MN-022	9327667	595420	684
N5W-FR01345	MN-023	9327667	595420	684
N5W-FR01345	MN-024	9327667	595420	684
N5W-FR01345	MN-025	9327667	595420	684
N5W-FR01345	MN-026	9327667	595420	684
N5W-FD1013	MN-027	9327204	594934	670
N5W-FD1013	MN-028	9327204	594934	670
N5W-FD0991	MN-029	9327126	594334	671
N5W-FD0991	MN-030	9327126	594334	671
N5W-FD0976	MN-031	9327226	594325	668
N5W-FD0976	MN-032	9327226	594325	668
N5W-FD0992	MN-033	9327115	594246	672
N5W-FD0948	MN-034	9327283	594986	674
N5W-FD0948	MN-035	9327283	594986	674

5.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TEXTURAL POR MICROSCOPIA ÓPTICA

Os estudos petrográficos foram realizados em nove lâminas polidas, possibilitando identificação dos principais tipos litológicos da mina de N5W, bem como foi possível visualizar algumas feições características dos oxi-hidróxidos de Fe e Mn presentes em veios nas fraturas e falhas, assim como no acamamento do minério de ferro da mina de N5W. Essas análises foram realizadas com auxílio de lupa binocular ZEISS- Stemi 2000-C e fotografadas com câmera Canon PowerShot G6 acoplada à lupa e microscópio ótico petrográfico Zeiss com luz transmitida e refletida nos Laboratórios de Mineralogia e Gemologia do PPGG do Instituto de Geociências da UFPA e também na sala de microscopia da Gerência de Exploração Mineral da Vale S/A (GAEMF-DIPF).

5.4 IDENTIFICAÇÃO MINERAL POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Para a identificação mineralógica foi empregada a técnica de DRX pelo método do pó. Para esse fim as amostras foram previamente pulverizadas e inseridas em porta amostra específico. As análises foram realizadas através de um difratômetro PANalytical, modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), com um goniômetro PW 3050/60 (theta-theta) equipado com um anodo de cobre ($\lambda_{Cu\ K\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$) em condições de funcionamento de 40 kV e 35 mA, detector do tipo RTMS, X'Celerator. A aquisição dos dados foi realizada através do software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com X'Pert HighScore versão 2.1b. As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização Mineralógica (LCM) do PPGG/IG/UFPA.

5.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

MEV foi empregada para observar as características morfológicas e texturais bem como realizar análises pontuais dos minérios de ferro com manganês da mina de N5W. O equipamento utilizado foi o LEO-ZEISS modelo 1430, equipado com Espectrometria de Energia Dispersiva (EED) a seco Sirius-SD para as análises químicas semiquantitativas. Para as imagens de elétrons retroespalhados (ERE) e análises químicas por EED as amostras foram metalização foram metalizadas com carbono. As condições de operação usadas para obtenção de imagens e análises químicas (Mn, Fe, Si, O, K, Ba e Pb) foram: corrente do feixe de elétrons de 90 μ A, voltagem de aceleração constante de 20 kV, distância de trabalho de 15 mm.

As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV) da UFPA.

5.6 ANÁLISES QUÍMICAS TOTAIS

As análises químicas totais foram realizadas nos laboratório da Acme Analytical Laboratories Ltd, no Canadá. Foram determinados os elementos maiores e menores na forma de óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 e MnO) e os elementos-traço na forma elementar (Ba, Be, Ce, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Au, Hg, Tl, e ETR).

Para a determinação dos elementos maiores e menores empregou-se a espectrometria de emissão por ICP-OES. Para este fim as amostras foram fundidas com metaborato/tetraborato de lítio e digeridas com ácido nítrico diluído. Para a determinação dos elementos traços refratários bem como os ETR utilizou-se Inductively Coupled Plasma - Mass Spectroscopy (ICP-MS). Para os demais elementos incluindo elementos preciosos, a amostra foi digerida em água régia, antes de ser analisada por ICP-MS. A perda ao fogo foi determinada por diferença de massas após calcinação da amostra a 1000 °C.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 GEOLOGIA DA MINA N5W

O mapa litológico da Mina N5W (Figura 4) e as exposições de campo (Figura 5) mostram que a área da cava e arredores é formada por rochas vulcânicas máficas sãs, semidecompostas e decompostas que se tornaram aflorantes por conta da lavra nas bordas da cava, e correspondem a Sequência Paleovulcânica Superior da Formação Igarapé Cigarra (Macambira, 2003). Intercaladas encontram-se formações ferríferas bandas, os jaspilitos, que ocupam a zona central da atual cava e o minério. Essas rochas vulcânicas básicas são semelhantes àquelas da Sequência Paleovulcânica Inferior, distinguindo-se das mesmas pelas intercalações lenticulares de formação ferrífera. Todas elas constituem unidades do Grupo Grão-Pará.

A hematita friável ocorre na forma de sequências tabulares de aspecto friável a pulverulento, constituída essencialmente por hematita, em que são frequentes octaedros milimétricos, sugerindo hematita pseudomórfica segundo magnetita (dita martitzada) e quartzo microcristalino (Figura 5 A e D). Relictos de jaspilitos podem ocorrer dentro do pacote de hematita friável, cujo tamanho diminui da base para o topo do mesmo. Veios ou vênulas de quartzo e de oxi-hidróxidos de Mn localmente seccionam os fragmentos de jaspilitos e mesmo de hematita friável. Níveis e vênulas milimétricos-centimétricos de aspecto argiloso, de ocorrência restrita, se encontram intercalados ou seccionam o minério de ferro dentro da mina (Figura 5 C). O minério de ferro com oxi-hidróxidos de manganês tende a apresentar coloração cinza esverdeado (Figura 5 B) constituindo-se assim em critério para distinguir o minério pobre nestes minerais. Os corpos restritos de hematitas compactas normalmente apresentam laminação plano-paralela.

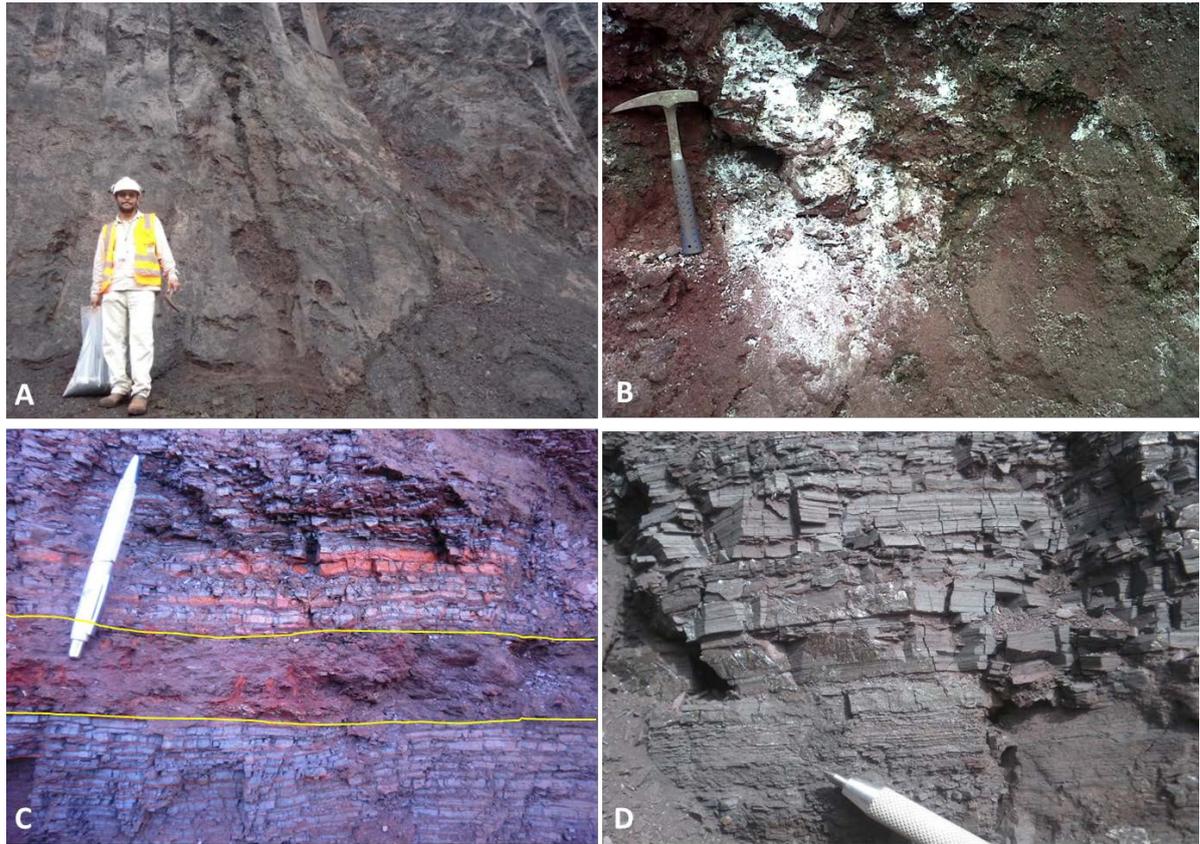


Figura 5 - (A) Frente de lavra de hematita friável (HF) a pulverulenta cinza escura; (B) Hematita friável com OH-Mn e quartzo friável (branco). A coloração cinza esverdeada ajuda na identificação das zonas com elevado teor de oxi-hidróxidos de manganês; (C) Hematita friável (HF) estratificada (estrutura reliquiar) com intercalação de material argiloso, destacado pela linha amarela; (D) Detalhe do minério a hematita friável estratificada e internamente laminada cinza escura, rica em ferro ($Fe > 65\%$).

Nos jaspilitos de N5W o bandamento composicional dado pela alternância de bandas de hematita e de quartzo microcristalino + hematita é a estrutura sedimentar típica, geralmente planar, regular e persistente. A espessura dessas bandas é variável e as bandas individualmente podem ainda conter bandamento ainda mais delgados ou ainda micro lentes (Figura 6 A). No plano do bandamento dos jaspilitos foram observadas estruturas de aspecto esferoidais de diâmetro milimétrico. Essas estruturas são preenchidas por óxidos de ferro e chert (Figura 6 B).

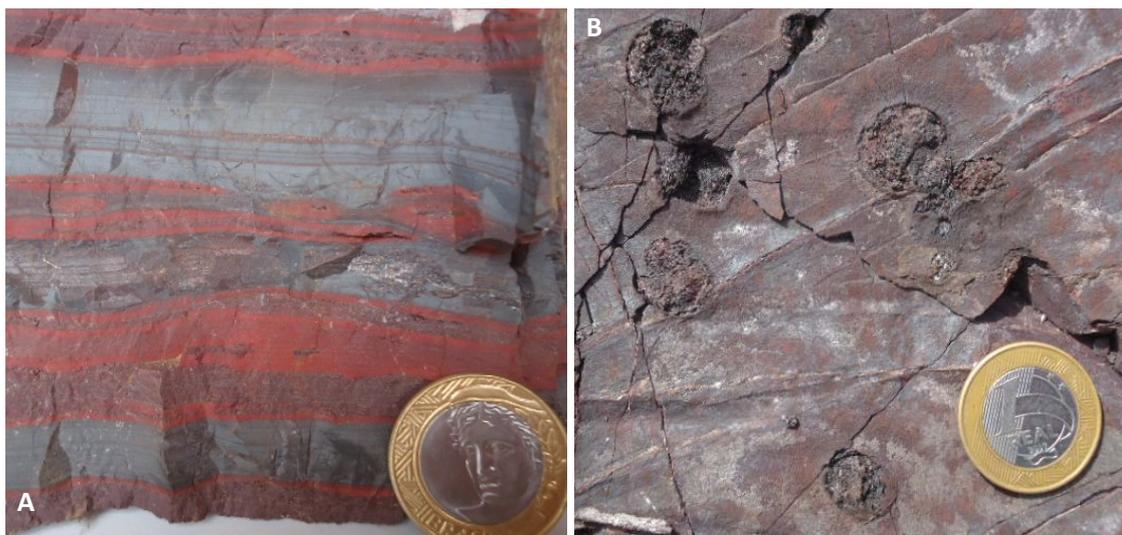


Figura 6 - (A) Regularidade e diferentes espessuras das bandas com laminação interna plano-paralela, tanto nas bandas de jaspe (quartzo microcristalino + hematita criptocristalina) como nas bandas de óxidos de ferro (hematita semicompacta a compacta). (B) Estruturas esferoidais na superfície de bandas hematíticas do jaspilito preenchidas também por hematita e quartzo microcristalino.

Boulders métricos de jaspilitos circundados por hematita friável são comuns em N5W. Esses corpos, em muitos casos, são os responsáveis por aumentar o teor de sílica no minério de ferro. Os boulders de jaspilitos apresentam bandamento com a mesma direção de mergulho da camada das hematitas friáveis (HF), sugerindo tratar-se do relicto de jaspilito do protominério reliquiar no perfil de alteração intempérica, o que corresponderia à zona saprolítica (Figuras 7 A e B).

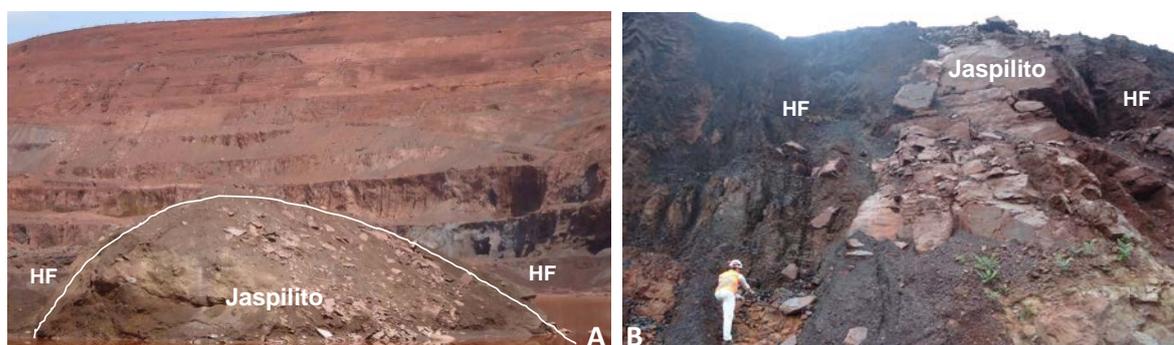


Figura 7 – (A) Bolsão de jaspilito (delimitado pela linha branca) completamente envolvido por hematita friável (HF); (B) Outra exposição de bolsão de jaspilito dentro do corpo de minério a hematita friável (HF).

Localmente é possível na zona saprolítica observar o minério a hematita friável em contato com as rochas vulcânicas máficas intemperizadas (basaltos) (Figura 8A). Essas rochas são consideradas como parte da Formação Cigarra. Boulders desses basaltos ainda frescos também foram observados na mina de N5W. Da mesma forma como os jaspilitos esses corpos máficos intemperizados ou não dentro do minério a hematita friável definem a zona saprolítica do perfil de alteração intempérico laterítica (Figura 8 B).



Figura 8 - (A) Contato abrupto entre o minério de ferro (Formação Carajás) representado por hematita friável à esquerda e rocha máfica intemperizada (Formação Cigarra) à direita. Mina N5W. Altura da bancada: ~15 m. (B) Boulders de basalto na Formação Cigarra.

A distribuição areal dos principais minérios de ferro frente às distintas bancadas na mina N5W (Figura 9) mostra que atualmente predomina minério a hematita friável. O minério a hematita compacta é muito restrito, da mesma forma que aquele formado por hematitas associadas aos minerais de Mn (hematita manganésífera). A relação espacial entre os minérios de ferro, jaspilito e rochas vulcânicas máficas, mostra nitidamente um perfil de alteração intempérica, laterítica. Os jaspilitos na base do minério convergem para bolsões de hematita compacta e estas para hematita friável, e finalmente são capeadas por delgado nível superficial de canga (canga de minério e canga química), a crosta laterítica típica, parcialmente intemperizada e, por conseguinte cavernosa. Perfil de alteração intempérica semelhante a este foi observado por (Costa et al., 2011) na região de N8. Para estes autores o minério de ferro da jazida de N8 (Serra Norte, Carajás), denominado de hematita friável, hematita compacta e canga de minério, está tipicamente ligado a perfil laterítico derivado diretamente das BIF'S (Banded Iron Formation).

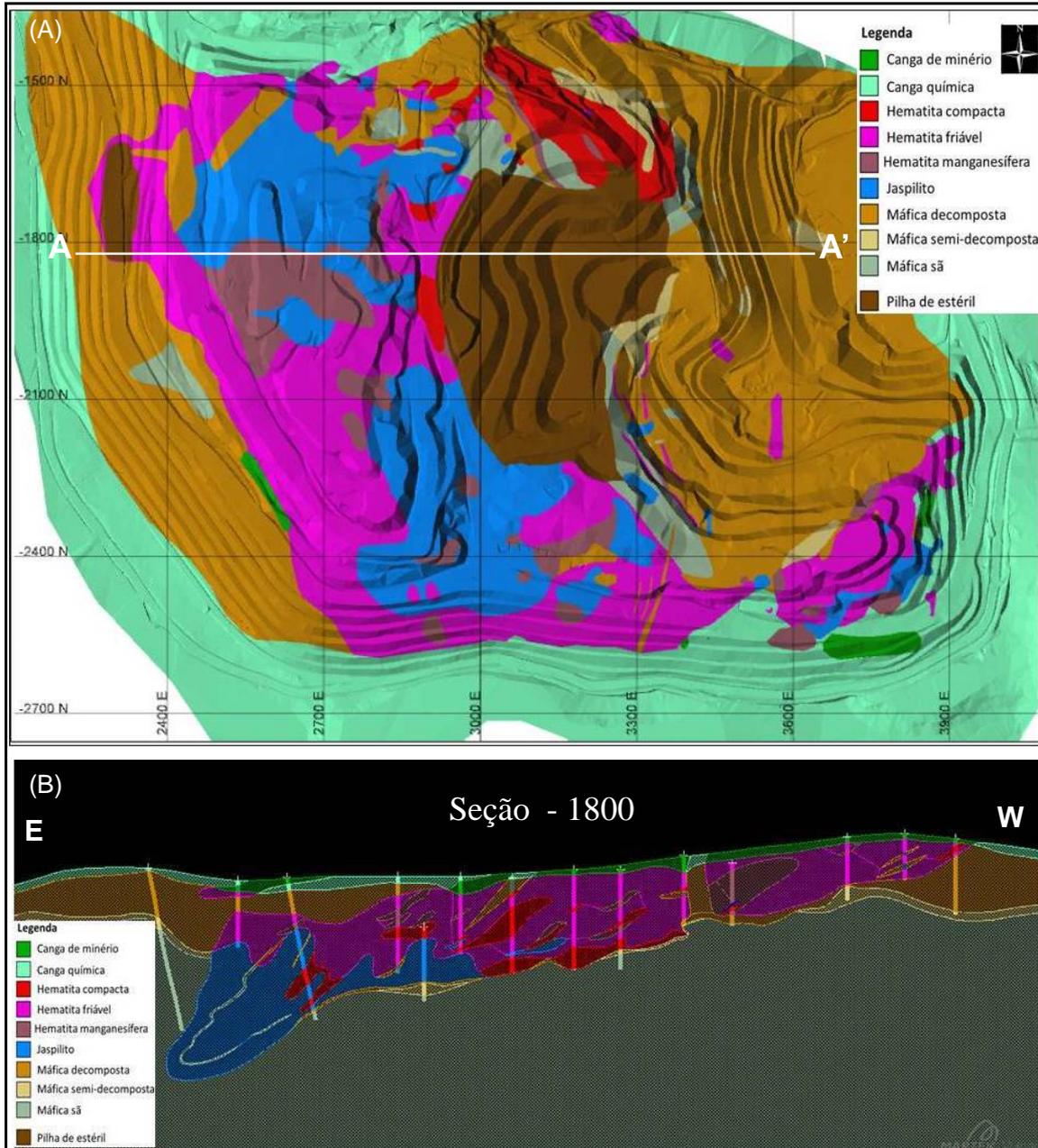


Figura 9 - (A) Mapa litológico de N5W (Vale, 2013. Relatório interno). (B) Seção geológica vertical (SV_ – 1800).

O mapeamento geológico e levantamentos aerogeofísicos permitiram identificar um importante sistema de lineamentos e falhas cujas direções principais são NW-SE e NE-SW, além de estruturas N-S com menor ocorrência (Figura 10), os quais devem ser pelo menos em parte responsáveis pela remobilização e consequente precipitação de oxi-hidróxidos de Fe e de Mn e quartzo microcristalino ao longo de fraturas e falhas dando origem aos inúmeros veios preenchidos com estes minerais ligados aos lineamentos estruturais indicados na figura 11, que são condizentes com as medidas estruturais coletadas para os planos de fraturas e

falhas encontradas em N5W. A associação de oxi-hidróxidos de Mn e de Fe com quartzo é bastante comum em veios desta mina. Segundo Domingos (2005) as principais direções de fratura observadas em N5W foram NE-SW e NW-SE, com mergulho em média 80°. Esse mesmo padrão de fraturas foi observado em trabalho de campo para este estudo, porém com mergulhos, em média, de 73°.

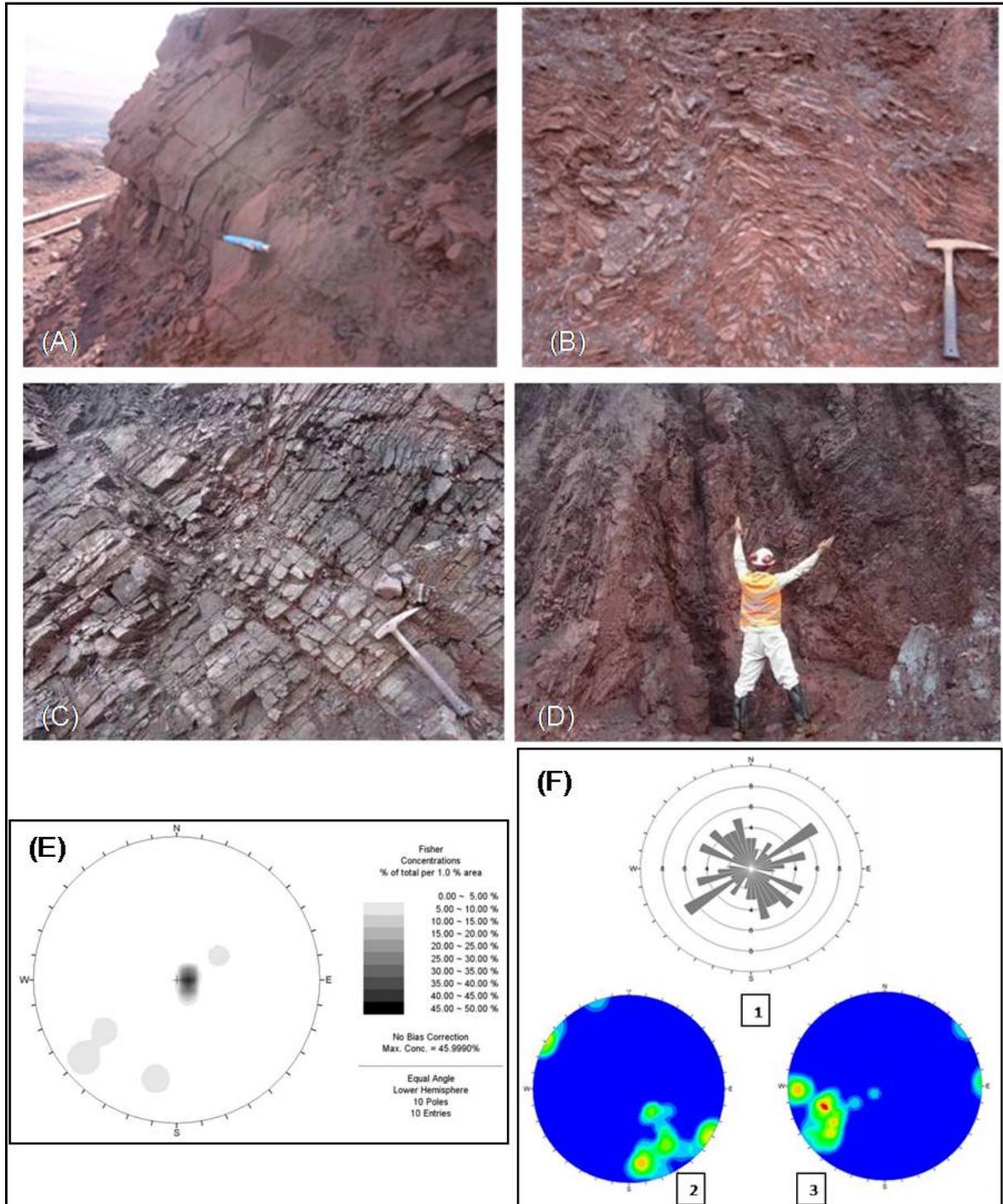


Figura 10 - (A) Jaspilito dobrado com eixo mergulhando para SW (250° Az/10°); (B) Dobras em estilo “kink bands” na hematita friável; (C) Jaspilito muito fraturado; (D) Zona de

cisalhamento impressa na hematita friável; (E) Projeção estereográfica mostrando as principais direções de eixos de dobras e (F) Projeção estereográfica dos planos de fratura da mina de N5W, onde (1) representa todas as direções dos planos de (2) e (3) representam as duas principais direções destes planos de fratura.

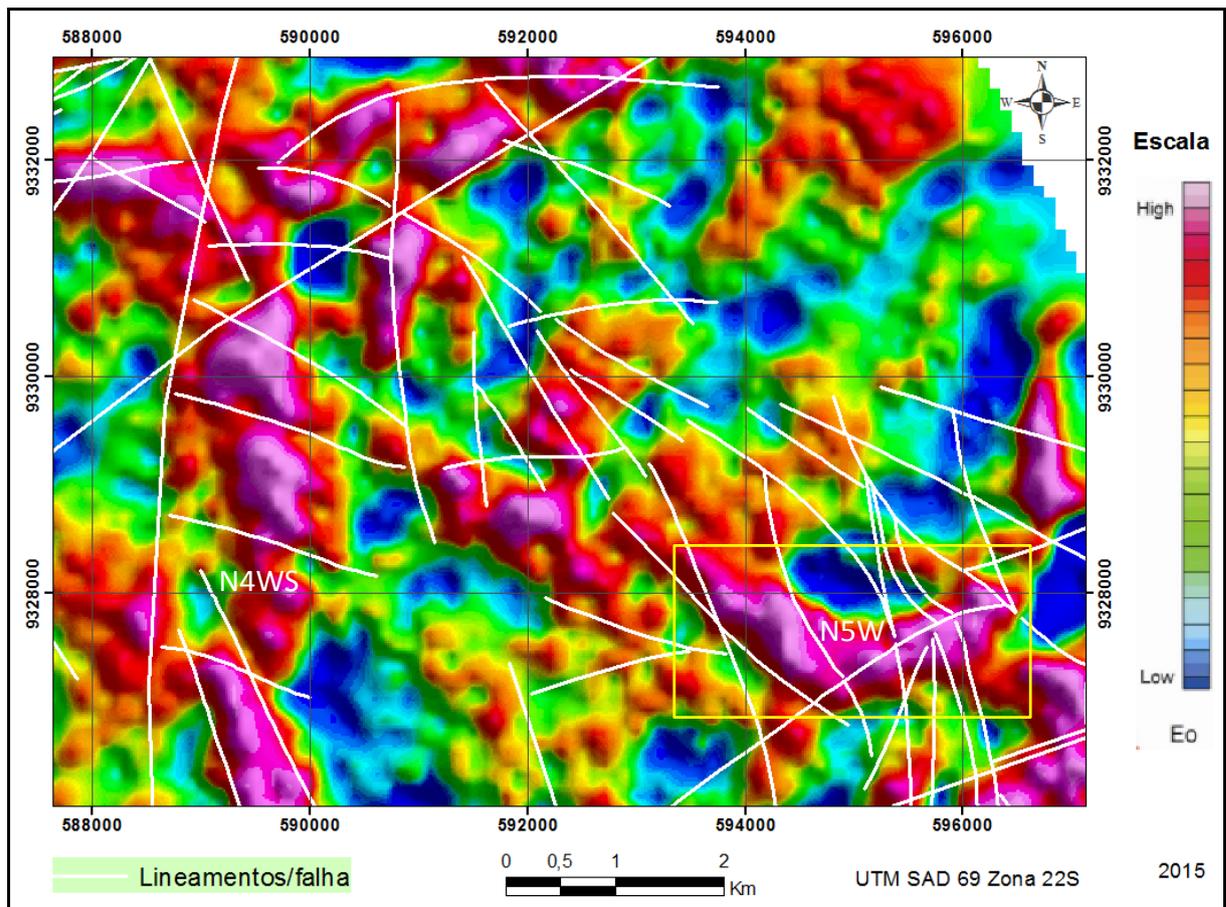


Figura 11 - Mapa geofísico aerogravimétrico (FTG) da parte norte de Carajás mostrando os principais lineamentos estruturais sobre o grid da componente T_{zz} , realçando as estruturas NW-SE, NE-SW e N-S. A mina de ferro de N5W está delimitada em amarelo.

O mapa geofísico aerogravimétrico (Figura 12) da mina N5W ressalta o domínio dos minérios de ferro com manganês sobreposto à componente T_{zz} .

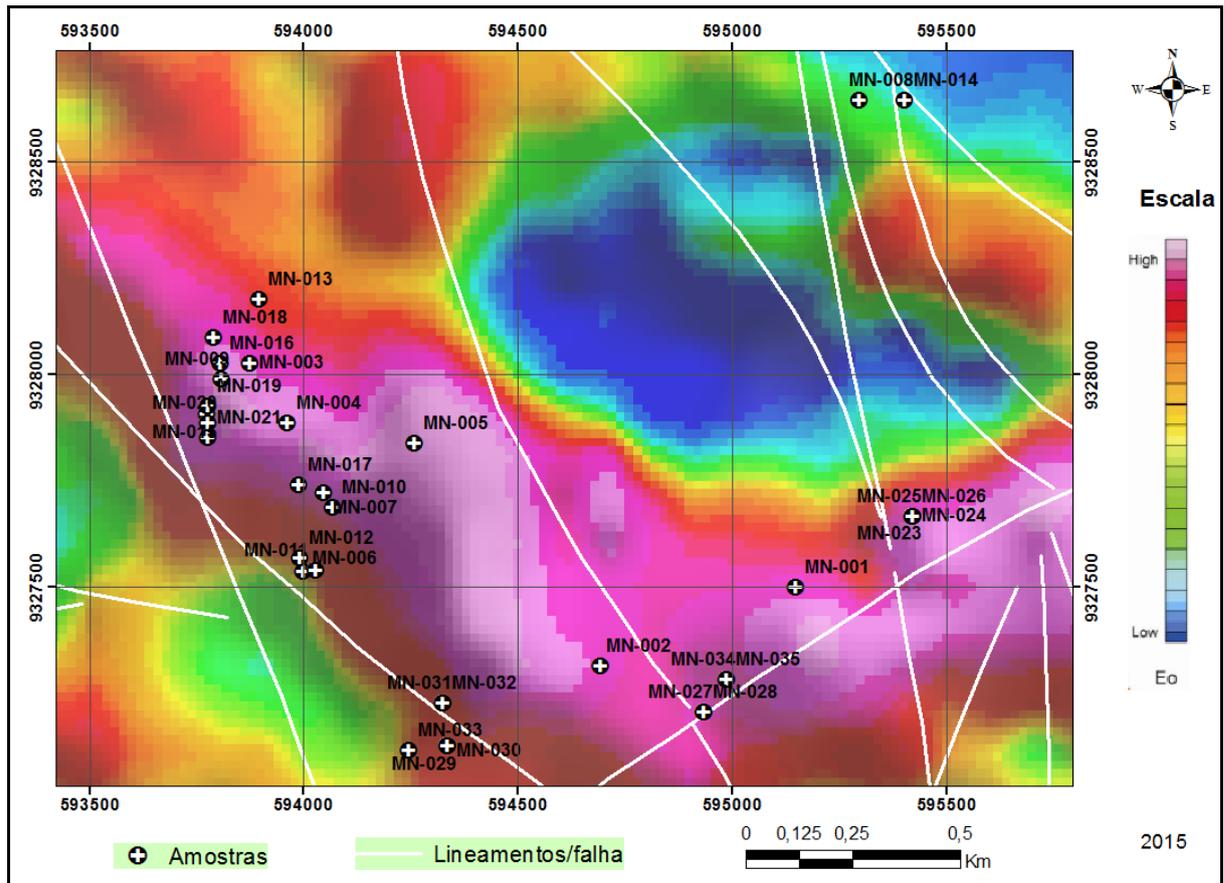


Figura 12 - Mapa geofísico aerogravimétrico da região da mina de N5W com a localização das amostras coletadas para análise química e identificação mineral (DRX e MEV).

Diques gabróticos estão presentes em N5W cortando as rochas da Formação Carajás e podem se constituir também em materiais contaminantes do minério de ferro de Carajás, sejam como minerais hidrotermais e/ou supergênicos, inclusive como fonte parcial para oxi-hidróxidos de Mn. Junto ao contato com estas intrusões há um ligeiro aumento no teor de manganês, sugerindo que estes diques possivelmente serviram como condutos para a percolação de fluidos ricos em oxi-hidróxidos de Mn (Figura 13).

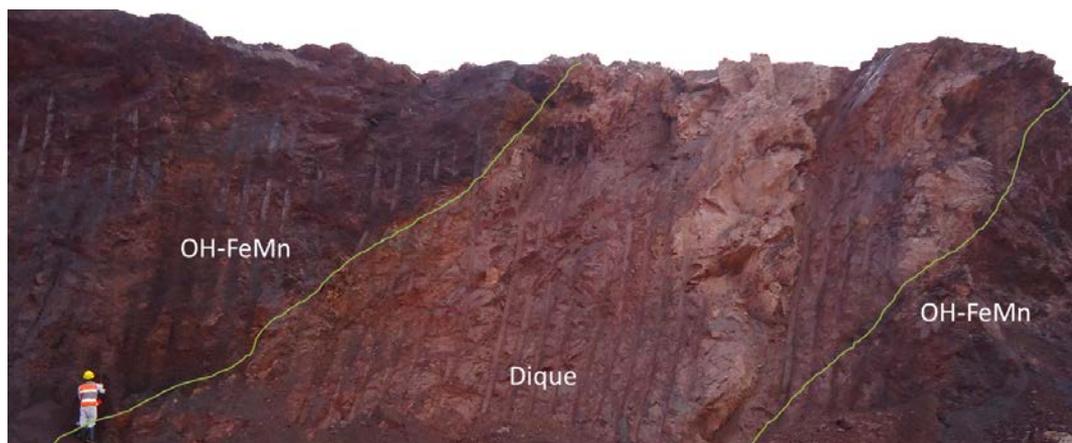


Figura 13 - Dique de rocha vulcânica máfica intemperizado seccionando o minério de ferro com oxi-hidróxidos de Mn associados. OH-FeMn: oxi-hidróxidos de ferro e manganês.

O contato por falha entre a hematita friável (Formação Carajás) e o basalto intemperizado (Formação Parauapebas) observada na mina de N5W apresenta traços levemente retilíneos com direção N-S e ângulo próximo de 50°. Junto à falha, a camada de hematita friável encontra-se completamente deformada, estando com a laminação (S0) verticalizada (Figura 14).



Figura 14 - Contato por falha entre a Formação Parauapebas (base) – lado direito da imagem e a Formação Carajás (topo) – lado esquerdo da imagem. Observa-se que a camada de hematita friável encontra-se completamente deformada e dobrada.

Por correlação com o minério de ferro de N8 (Costa et al., 2011) o minério de ferro da mina de N5W, como demonstram os dados apresentados, desenvolveu-se a partir dos

jaspilitos da Formação Carajás (Costa, 1997) intercalados com rochas vulcânicas máficas da Formação Parauapebas (sequência inferior) e Formação Cigarra (sequência superior). O espesso pacote laterítico enriqueceu-se em hematita friável a compacta, com teores de Fe_2O_3 atingindo valores superiores a 65 %. Localmente os jaspilitos podem conter bolões de minério de ferro já com alto teor (> 65% de Fe) pré-intempéricos, denominados pelos geólogos da Vale S.A. de hematita friável ou hematita compacta, e dependendo da quantidade de MnO o minério pode ser classificado como hematita manganesífera ($\text{MnO} > 2\%$).

6.1.1 Petrografia

6.1.1.1 Basaltos

São afaníticos, fortemente fraturados, de textura intergranular, compostos essencialmente de plagioclásio imersos em uma massa cloritizada (Figura 15).

Os plagioclásios em 10 % da rocha são geralmente ripiformes e moderadamente sericitizados. Localmente apresentam-se fortemente deformados em suas maclas. A clorita, que perfaz 80% da rocha, constitui a massa de granulação muito fina, onde pouco se discerne os tamanhos dos cristais. Em parte parece substituir os plagioclásios, englobando-o. A titanita encontra-se disseminada na rocha (em torno de 5%) em cristais anédricos, com dimensões entre 10 e 50 mm, raramente observam-se cristais maiores.

Geralmente associados a estes minerais observam-se os minerais opacos (4%), que são anédricos a subédricos e são moderadamente fragmentados. Ainda, observa-se pontualmente a presença de micas brancas e apatita, com proporções menores que 1%. Ocorrem como minerais acessórios a titanita e subordinadamente opacos (óxidos de ferro).

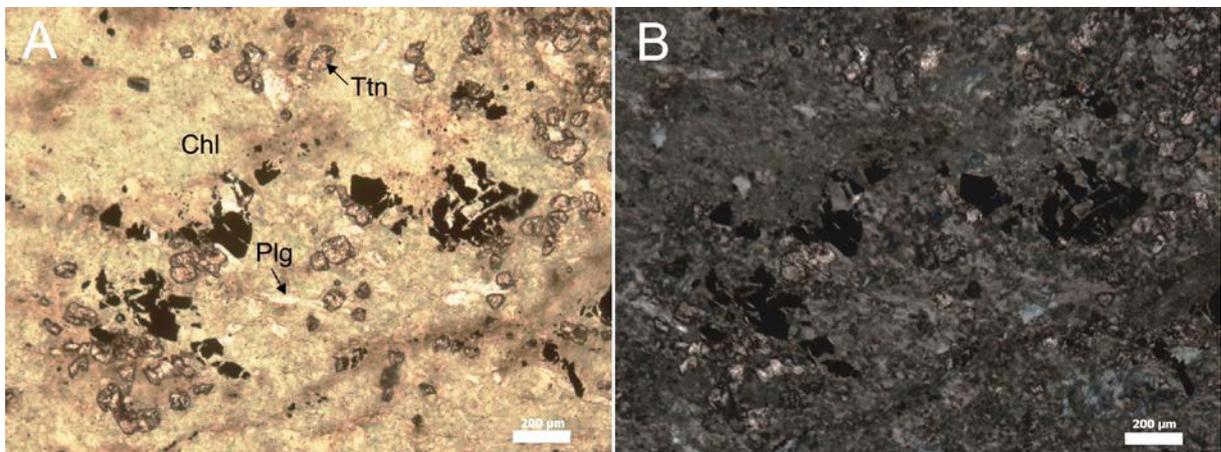


Figura 15 - (A) Basalto cloritizado constituído mineralogicamente por titanita (Ttn), clorita (Chl) e plagioclásio (Plg), visualização textural a nicóis paralelos. (B) Mesma fotomicrografia a nicóis cruzados.

6.1.1.2 Gabros

Rocha fanerítica de textura idiomórfica, predominantemente subofítica, granulação grossa, constituída essencialmente de plagioclásio e piroxênio, além de anfibólio, clorita e carbonatos (Figura 16).

O plagioclásio perfaz cerca de 50% da rocha, com forma euédrica a subédrica, e seus cristais (variam de 1,5 a 3,9 mm) apresentam maclas do tipo Carlsbad e albita-periclina. Estão fortemente sericitizados. Alguns cristais foram substituídos quase que total para carbonatos.

Os piroxênios (25%) estão fortemente uralitizados, substituído mimeticamente por anfibólio e clorita, além de carbonatos nas bordas e fraturas. Os anfibólios (5%) apresentam pleocroísmo de marrom alaranjado a creme amarelo pálido e substituem parcialmente os piroxênios nas suas bordas e parte do núcleo.

A clorita (10%) ocorre principalmente nos interstícios dos cristais de piroxênio.

O quartzo (4%) é intersticial, localmente granofírico com o plagioclásio. Por outro lado, os opacos (5%) ocorrem associados aos piroxênios e são subédricos a anédricos, localmente vermiculares, em associação com clorita, ou mesmo como pequenas inclusões nos piroxênios e clorita. São acessórios apatita e biotita (1%).



Figura 16 - (A) Gabro constituído de plagioclásio (Plg), quartzo (Qtz), clorita (Chl), piroxênio (Px) e anfibólio (Anf) em nicóis paralelos. (B) Mesma fotomicrografia a nicóis cruzados.

6.1.1.3 Jaspilitos

Apresentam bandamento de continuidade regular, formado pela alternância de bandas de óxidos de ferro (hematita, magnetita) e bandas de quartzo criptocristalino, geralmente impregnadas por finas partículas de hematita, conferindo-lhe o aspecto de jaspe. A coloração geral varia de vermelha a branca acinzentada, e não há evidências de alterações por metamorfismo. A espessura das bandas é variável, entre 0,1 mm a 2 cm. O microbandamento é geralmente contínuo, levemente ondulado a plano. Lentes de quartzo microcristalino ocorrem nas bandas de ferro (Figura 17).

Localmente, no entanto, observam-se partes *boudinadas*, que de acordo com Macambira (2003) poderia ser produto de compactação diferencial que tende a romper a camada de jaspe, num estágio mais avançado de *boudinage* (Figura 18). Sob o microscópio óptico foram observados possíveis cristais de magnetita substituídos completamente por carbonatos (Figura 18).

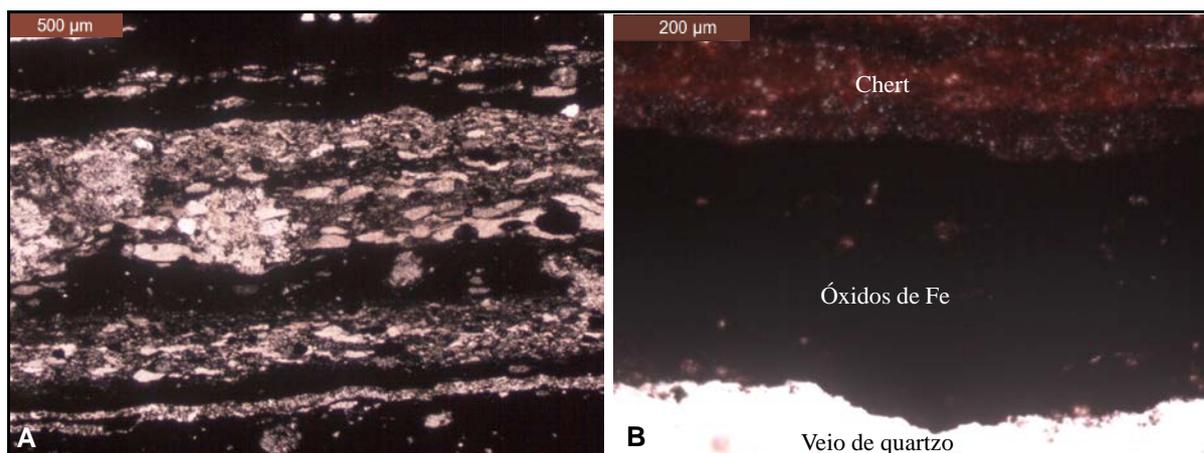


Figura 17 - (A) Bandamento composicional ressaltado pelas bandas de óxidos de ferro e quartzo criptocristalino (chert). (B) Contato abrupto entre as bandas de óxidos de ferro e jaspe (quartzo criptocristalino com óxidos de Fe, principalmente hematita), além de lentes de quartzo microcristalino nas bandas de óxidos de Fe no jaspilito. Fotomicrografia de lâmina delgada.

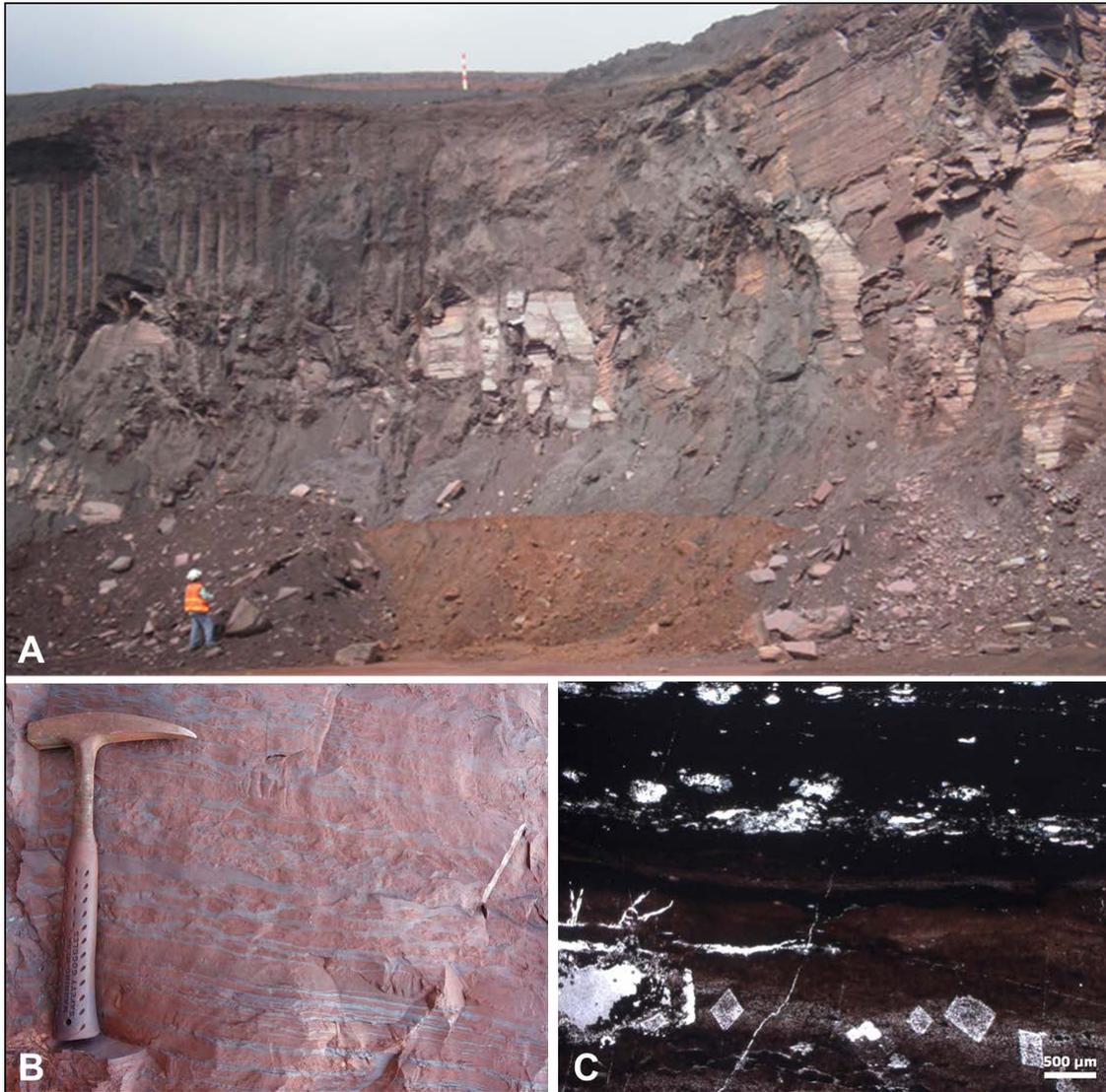


Figura 18 - (A) Jaspilito compacto em frente de lavra da mina de N5W em contato com o minério a hematita friável; (B) Detalhe do jaspilito compacto mostrando bandas de quartzo microcristalino vermelho intercalado com bandas de óxidos de ferro cinza escura com porções boudinadas; (C) Fotomicrografia óptica mostrando relictos de cristais octaédricos de magnetita substituídos por carbonato.

Localmente observou-se nas bandas de chert a presença de esferulitos com diâmetro entre 14 a 28 μm , constituídos por um núcleo subcircular de hematita envolto por uma auréola de quartzo microcristalino (Figura 19). Para (Lindenmayer et. al., 2001) o diâmetro varia entre 0,005 a 0,02 mm. Essas estruturas são mais frequentes nas bandas de jaspe e menos frequente nas bandas de chert, onde há menos hematita e os contornos dos esferulitos são incompletos (Macambira, 1992). Macambira (2003) interpreta os esferulitos como possíveis microfósseis, sugerindo que estes tenham interferido diretamente na produção de oxigênio para a

precipitação do ferro, pois poderiam estar presentes no ambiente deposicional dos jaspilitos. Entretanto, Mukhopadhyay & Chanda (1972) consideram estas estruturas como elementos singenéticos, possivelmente originados da precipitação de um gel coloidal.

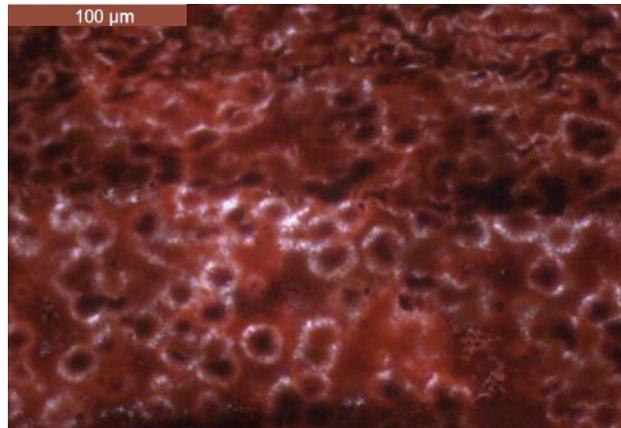


Figura 19 - Fotomicrografia de microesferulitos nas bandas de chert, mostrando um núcleo arredondado de hematita envolvido por quartzo microcristalino. Luz transmitida, nicóis cruzados.

Localmente o bandamento dos jaspilitos encontra-se perturbado por falhas e fraturas preenchidas por quartzo, com espessuras variáveis perpendiculares e paralelas ao bandamento (Figura 20 A). Em alguns casos, essas falhas e fraturas são descontínuas ou mostram deslocamentos horizontais dentro da mesma banda. Observam-se, ainda, cristais octaédricos de magnetita substituídos por carbonatos (Figura 20 B).

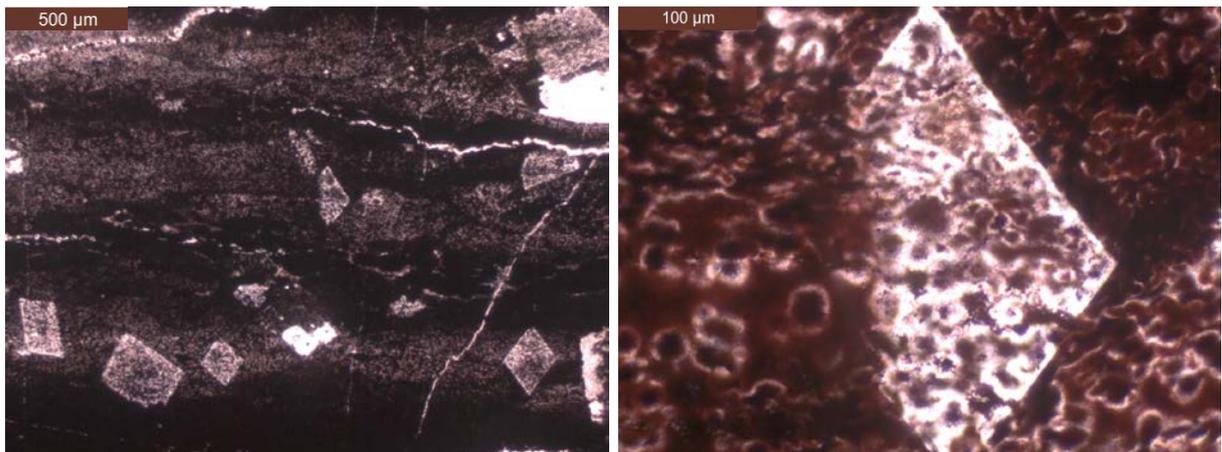


Figura 20 - (A) Micro a mesobandas de chert e óxidos de ferro em possíveis cristais octaédricos de ou seriam moldes de possíveis romboedros. (B) Detalhe do cristal de contorno romboédrico englobando os esferulitos ou possível octaedro. Luz transmitida, nicóis cruzados.

6.1.1.4 Jaspilitos Intemperizados

Os jaspilitos quando ligeiramente intemperizados se constituem ainda de *chert*, hematita, magnetita, “martita” (hematita pseudomórfica de magnetita octaédrica), goethita, pirolusita, hollandita e criptomelana, que ainda exibem um sutil bandamento de dimensões milimétricas (Figura 21). Os minerais de Mn como a pirolusita, um dos principais focos deste trabalho, é creme, fibrosa, em contato irregular com os demais minerais, mas mostra íntimo intercrescimento com a criptomelana, assim como observado por Costa et al. (2006) na mina de manganês do Azul. A hematita junto aos minerais de Mn ocorre como uma trama granular, de hábito eudral a subeudral, mostrando contato irregular com a pirolusita. A magnetita foi observada como cristais cúbicos isolados envoltos por chert. Cristais de hematita substituídos por goethita e cristais de magnetita por hematita e “martita” foram observados nas bandas de chert, que contém hematita e goethita microcristalinos (Figura 22 A, C e D). A maghemita é cinza azulada, isotrópica e ocorre também como produto de alteração da magnetita. A goethita de coloração amarelada ocorre envolvendo parte do chert (Figura 22 B). A criptomelana ocorre por vezes como uma massa microcristalina, mas localmente forma agregados micrométricos em forma de gramínea com terminações de pirolusita. A hollandita mostra-se como cristais subeudrais a anédricos, sempre associada à pirolusita, mas e em uma proporção bem menor.

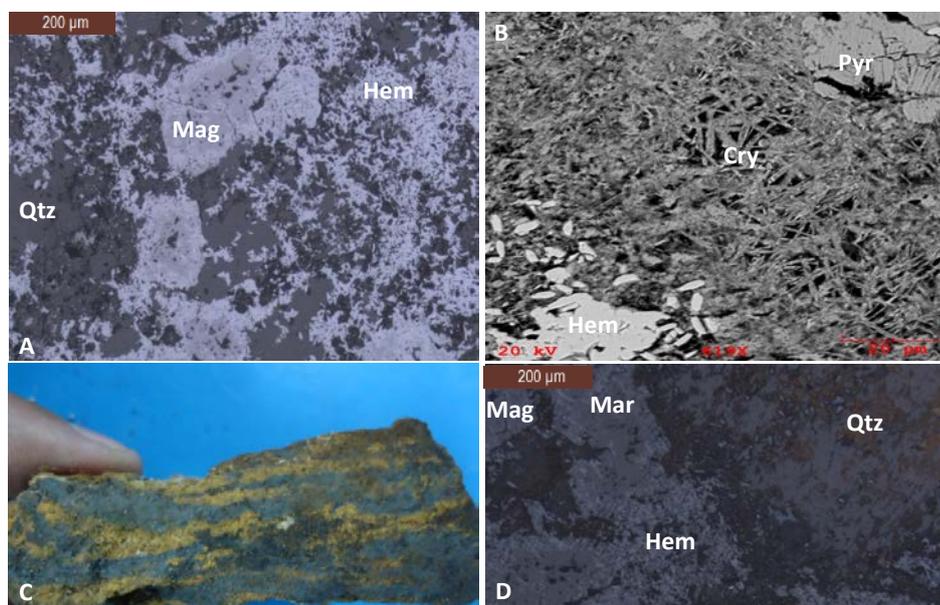


Figura 21 - (A) Cristais de hematita (Hem), magnetita (Mag) e quartzo (Qtz). (B) Hematita (Hem) e criptomelana (Cry). MEV, elétrons retroespalhados (ERE). (C) Jaspilito parcialmente intemperizado. (D) Detalhe da banda dominada por hematita, magnetita e “martita”, além de quartzo do jaspilito da imagem C.

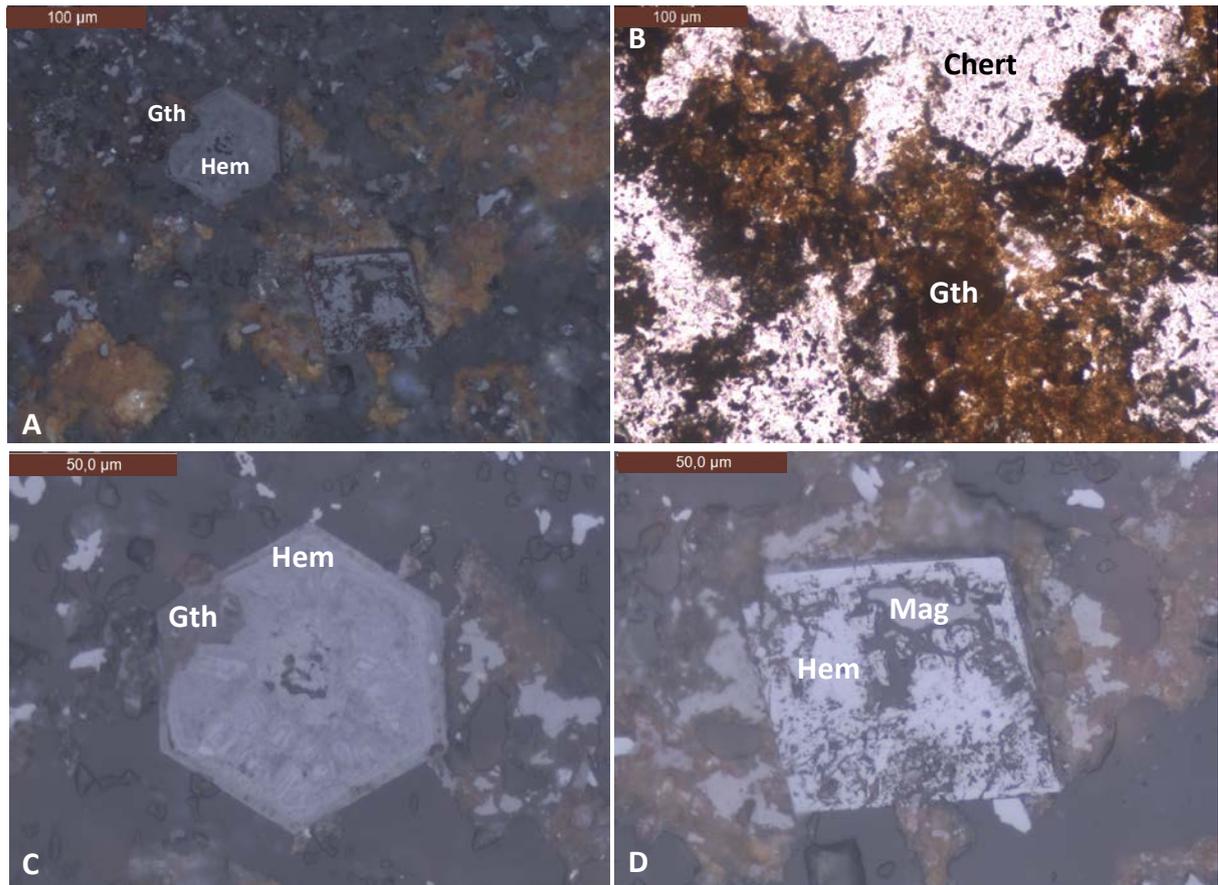


Figura 22 - Fotomicrografias a partir de lâmina polida do minério de Fe. (A) Cristais isolados de hematita (Hem) com borda substituída parcialmente por goethita (Gth) e magnetita (Mag) por hematita (Hem). (B) Plasma de goethita envolvendo parte dos cristais de chert. (C) Cristal hexagonal de hematita com borda de goethita por substituição. (D) Cristal de magnetita substituído por hematita.

6.1.1.5 O Minério de Ferro e Canga

O minério de ferro em lavra está representado por hematita friável (Figura 9), de maior extensão areal e volumétrica, preferencialmente próxima ao contato com as máficas, que aparentemente envolvem os corpos menores de hematita “manganesífera” (associada com oxi-hidróxidos de Mn) e finalmente hematita compacta, em corpo restrito a nordeste da atual cava e outro bem menor no centro. Canga química, isto é, uma crosta laterítica ferruginosa cavernosa, mais aluminosa e em geral com maior conteúdo de fósforo, parece se sobrepor preferencialmente as vulcânicas decompostas, em vários corpos pequenos isoladas. Finalmente uma canga de minério, também uma crosta ferruginosa cavernosa, com alto teor de ferro e pobre em Al, Si e P, ao contrário da anterior, e daí ser considerada como minério marginal, com distribuição isolada, na borda da cava, portanto nas partes mais altas, que

certamente fora mais abundantes, antes da lavra. Crostas desta natureza correspondem ao topo do perfil laterítico e tendem então a ocupar as partes mais elevadas da topografia. O minério de ferro friável corresponde à alteração saprolítica inicial a avançada dos jaspilitos, em parte a hematita “manganesífera”, enquanto a hematita compacta corresponde a possíveis enriquecimentos hidrotermais, da mesma forma que parte da hematita “manganesífera”. A parte basal do minério a hematita friável corresponde ao jaspilito intemperizado, o que representa a zona saprolítica, em que boulders de tamanhos variados dessa rocha se tornam cada vez mais frequente em direção à base da alteração, que é também da cava.

6.2 MINERALOGIA E MODO DE OCORRÊNCIA DOS MINERAIS DE MANGANÊS E FERRO

Observações de campo mostram que os minerais de manganês estão associados a veios e vênulas ferro-manganesíferas alojados em fratura e zonas de falhas, bem como no contato entre os jaspilito e/ou minério de ferro e os corpos de rochas máficas; e possivelmente a lentes intercaladas no protominério (jaspilitos) e minério de ferro. As zonas de falhas e fraturas possuem direções NE-SW, NW-SE e N-S concordantes com as zonas de cisalhamento regional, e nelas estão contidos os minerais oxi-hidróxidos de Mn de N5W. A espessura destas zonas com minerais de Mn varia de 3 centímetro a cerca de 5 metros.

O mapa de isoteor de manganês elaborado através do *software Vulcan*, utilizando-se a base de dados da Vale S.A, indica que as principais ocorrências de manganês concentram-se na porção centro-oeste da mina, porém com ocorrências discretas em todas as partes da mina de N5W (Figura 23). Os teores de MnO se concentram principalmente entre os valores 2 a 5 %, mas em determinados locais desta mina ocorrem valores superiores a 10%. Porém, em veios de oxi-hidróxidos de Mn e de Fe observam-se teores de MnO atingindo até 61,74%. É nítida a relação entre os teores mais elevados de manganês e as zonas próximas aos diques de rocha máfica, em que os minerais de Mn estão localizados nas fraturas e falhas, sugerindo remobilização e reprecipitação de seus minerais, em que a fonte poderia ter sido as próprias BIFs com manganês. O teor médio de MnO extraído do banco da dados da mina de N5W (n5flp_fsoassay_04122013) em 84 intervalos amostrais de jaspilitos foi de 0.73%, ou seja, o protominério encontra-se enriquecido em Mn, embora não tenha sido observada formações ferríferas manganesíferas durante as descrições dos testemunhos de sondagem pelos geólogos da Vale S.A (GAEMF-DIPF) no período de execução deste trabalho. No entanto, o mapa (Figura 9) registra claramente hematitas “manganesíferas”, extrapolando a ocorrência de vênulas e veios.

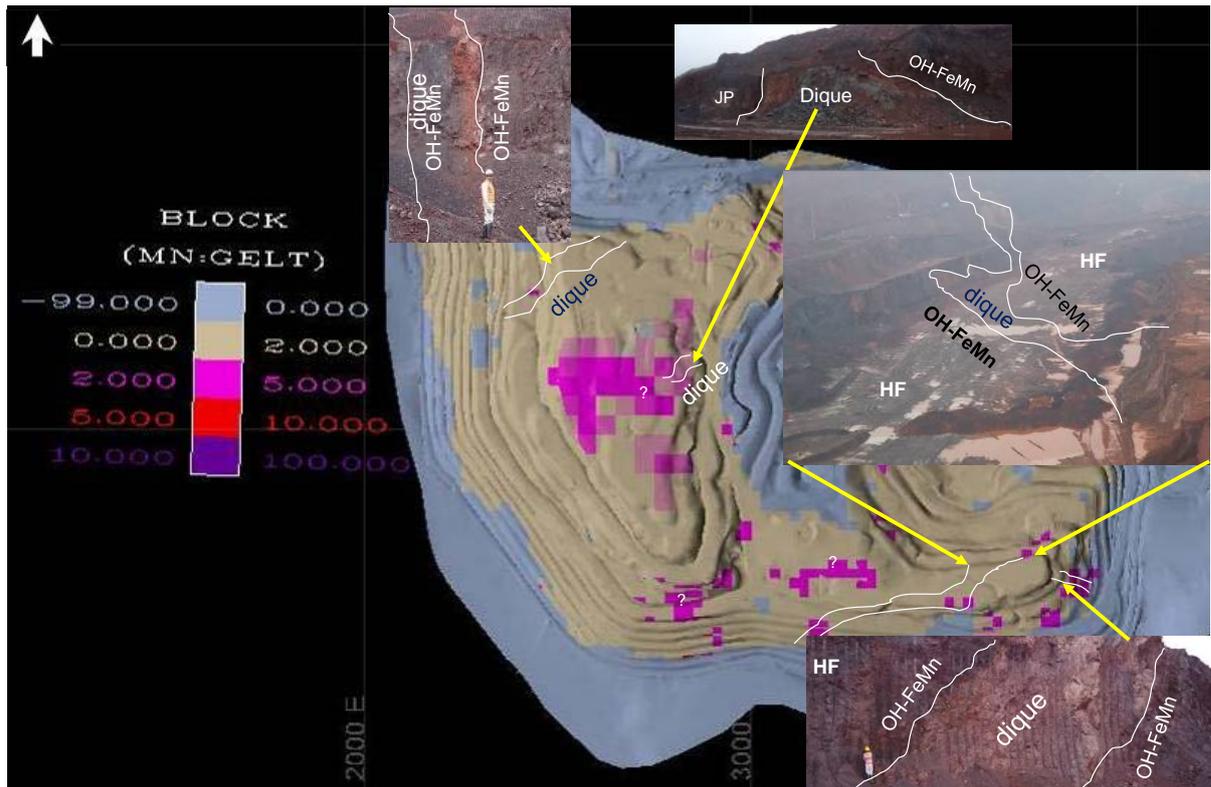


Figura 23 - Mapa de domínio dos teores (em %) de Mn e indicação das ocorrências de diques de rochas vulcânicas máficas com oxi-hidróxidos de manganês associados na mina de N5W.

Os principais minerais de manganês identificados por DRX (Figura 24) são pirolusita, bixbyita, criptomelana, hollandita, braunita, ramsdellita e calcofanita, todos oxi-hidróxidos de Mn, exceto a braunita, um silicato (Tabela 2). Essas espécies de minerais de Mn parecem ser controladas pelo modo de ocorrência. Por exemplo, pirolusita, bixbyita e braunita foram identificadas preferencialmente nas zonas de falhas como veios hidrotermais típicos, enquanto a criptomelana ocorre em zonas com aparente ligação com lentes pequenas e delgadas.

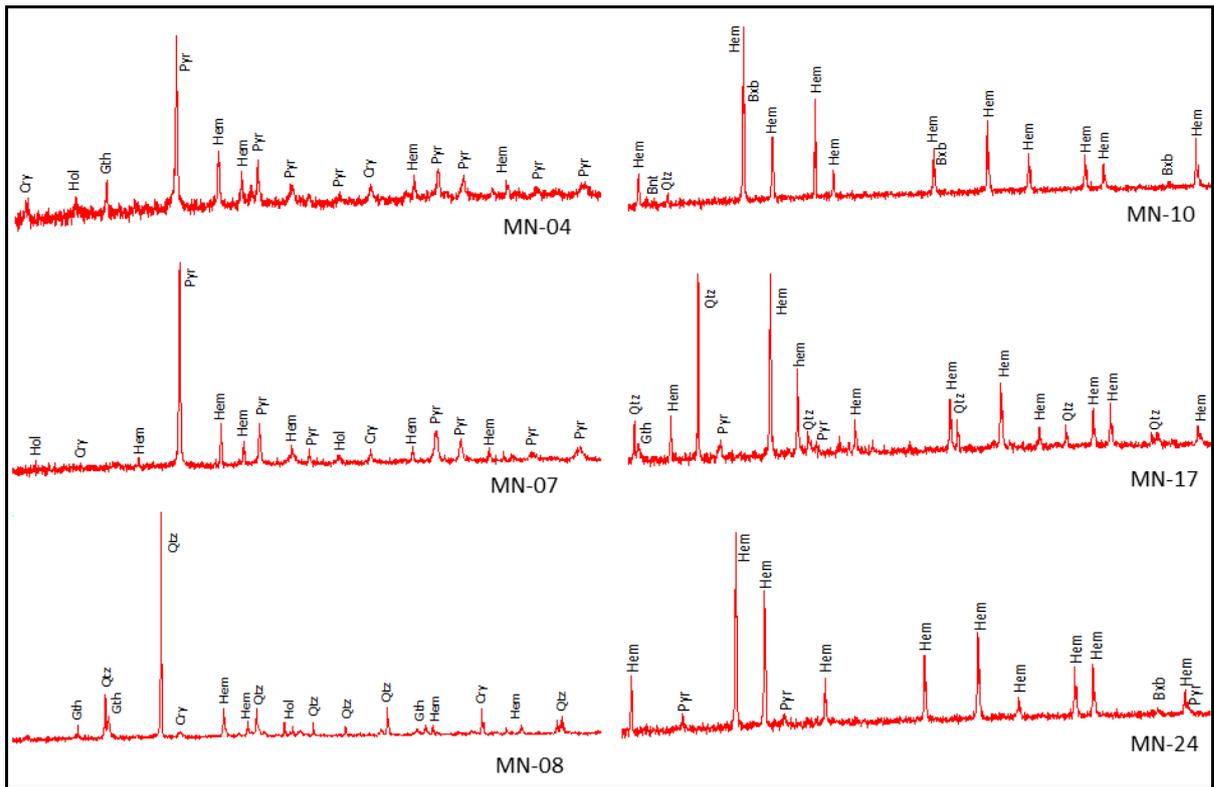


Figura 24 - Minerais identificados por DRX: hematita (Hem); goethita (Gth); criptomelana (Cry); ramsdelita (Rdl); braunita (Bnt); bixbyita (Bxb); pirolusita (Pyr) e quartzo (Qtz).

Tabela 2 – Principais minerais identificados e abundância qualitativa nas amostras de minério de ferro e manganês associados em N5W.

Identificação	Minerais de Mn							Minerais de Fe			Minerais de SiO ₂
	Pyr	Cry	Hol	Bra	Bxb	Cal	Rdl	Hem	Mag	Gth	Qtz
MN-01						x		xxx			
MN-02	xxx	xx					x	xxx			xxx
MN-03								xxx			xxx
MN-04	xxx	xx	xx					xxx			
MN-05								xxx			xxx
MN-06				xx				xxx			
MN-07	xxx	xx	xx	xx				xxx			
MN-08		xx	xx					xxx		xx	xxx
MN-09	xxx							xxx			xxx
MN-10				xx	x			xxx			xxx
MN-11	xxx		xx					xxx		xx	xxx
MN-12	xxx							xxx			xxx
MN-13	xxx	xx						xxx			xxx
MN-14				xx				xxx			xxx
MN-15					xxx			xxx			
MN-16					xxx			xxx			xxx
MN-17	xxx							xxx		xx	xxx
MN-18					xxx			xxx			xxx
MN-19					xxx			xxx			xxx
MN-20				xx				xxx			
MN-21				xx	xxx			xxx			
MN-22				xx	xxx			xxx	x		
MN-23	xxx							xxx			
MN-24	xxx				xxx			xxx			
MN-25		xx			xxx			xxx			
MN-26	xxx				xxx			xxx			
MN-27				xx	xxx			xxx		xx	
MN-28	xxx							xxx	x		xxx
MN-29			xx		xxx			xxx		xx	
MN-031					xxx			xxx		xx	
MN-032	xxx		xx					xxx		xx	
MN-033					xxx			xxx		xx	
MN-034					xxx			xxx			
MN-035					xxx			xxx		xx	

xxx: abundante

xx: frequente

x: ocasional

Legenda: pirolusita (Pyr), criptomelana (Cry), hollandita (Hol), braunita (Bra), bixbyita (Bxb), Calcofanita (Cal), ramsdelita (Rdl), hematita (Hem), magnetita (Mag), goethita (Gth), quartzo (Qtz).

Ao longo de fratura seccionando a rocha máfica decomposta (MD) com 3 m de espessura e aproximadamente 35 m de altura na frente de lavra (Figura 25), foram identificados ramsdelita ($Mn^{4+}O_2$), pirolusita e criptomelana ao lado da hematita (Fe_2O_3). Por outro lado na zona de influência de uma intrusão de rochas máficas no furo de sondagem N5W-FD01386, os minerais de manganês são pirolusita e, em menor proporção, hollandita e/ou criptomelana, além é claro de hematita como mineral mais abundante, goethita e quartzo microcristalino. Embora ainda não claramente definido as porções possivelmente lenticulares tem na criptomelana como o principal mineral de Mn.

Em lâmina polida sob o microscópio óptico confirma-se a transformação da magnetita octaédrica em hematita (substituição pseudomórfica), além da hematita em trama lamelar, por vezes em contato irregular com a pirolusita, quando assume aspecto fibroso e se associa com hollandita. Em outro furo de sondagem N5W-FD01429 (Figura 26 A a D) observa-se nitidamente vênulas e bolsões de oxi-hidróxidos de manganês (tonalidade escura) associados com oxi-hidróxidos de ferro e quartzo microcristalino seccionando e invadindo as diferentes bandas do jaspilito. Ainda neste furo este mesmo aspecto foi observado nos gabros (Figura 26 E).

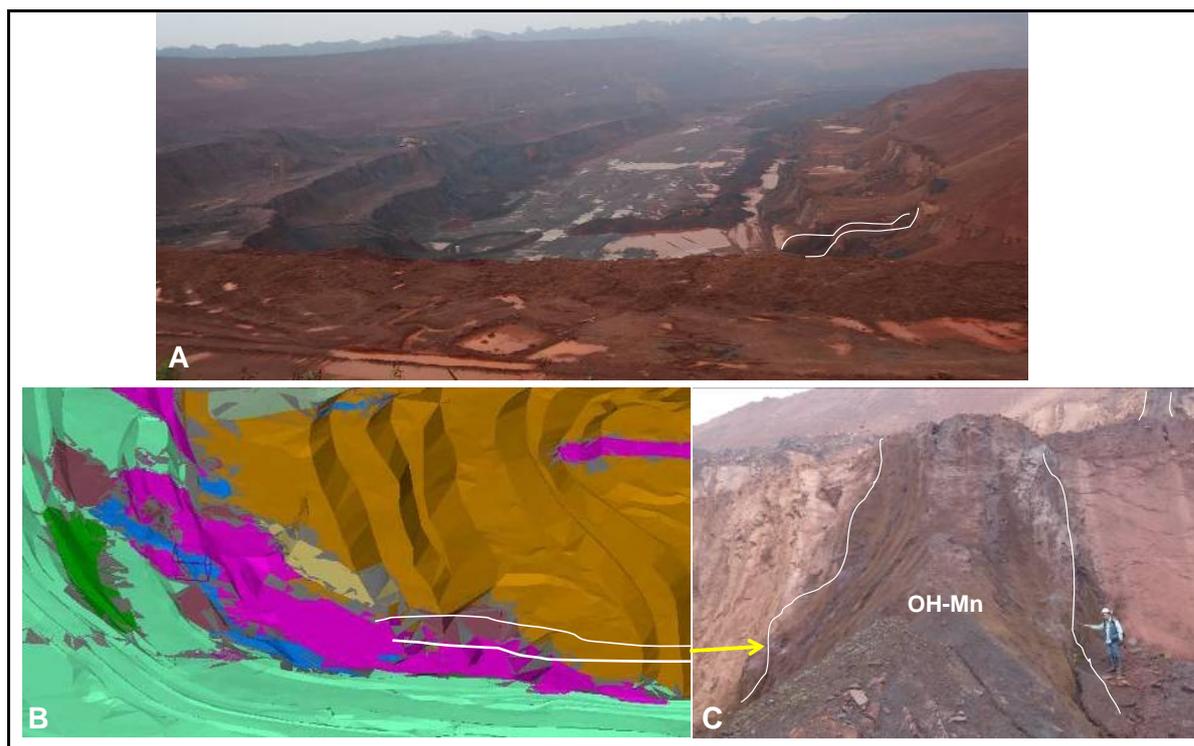


Figura 25 - (A) Visão geral da parte noroeste de N5W mostrando a zona de falha (faixa delimitada pelas linhas brancas) com oxi-hidróxidos de manganês e ferro. (B) Mapa litológico de N5W destacando a zona de falha com oxi-hidróxidos de Mn (C) Exposição de oxi-hidróxidos de Mn (ramsdelita, pirolusita e criptomelana) e hematita ao longo da zona de falha. OH-Mn: oxi-hidróxidos de Mn.

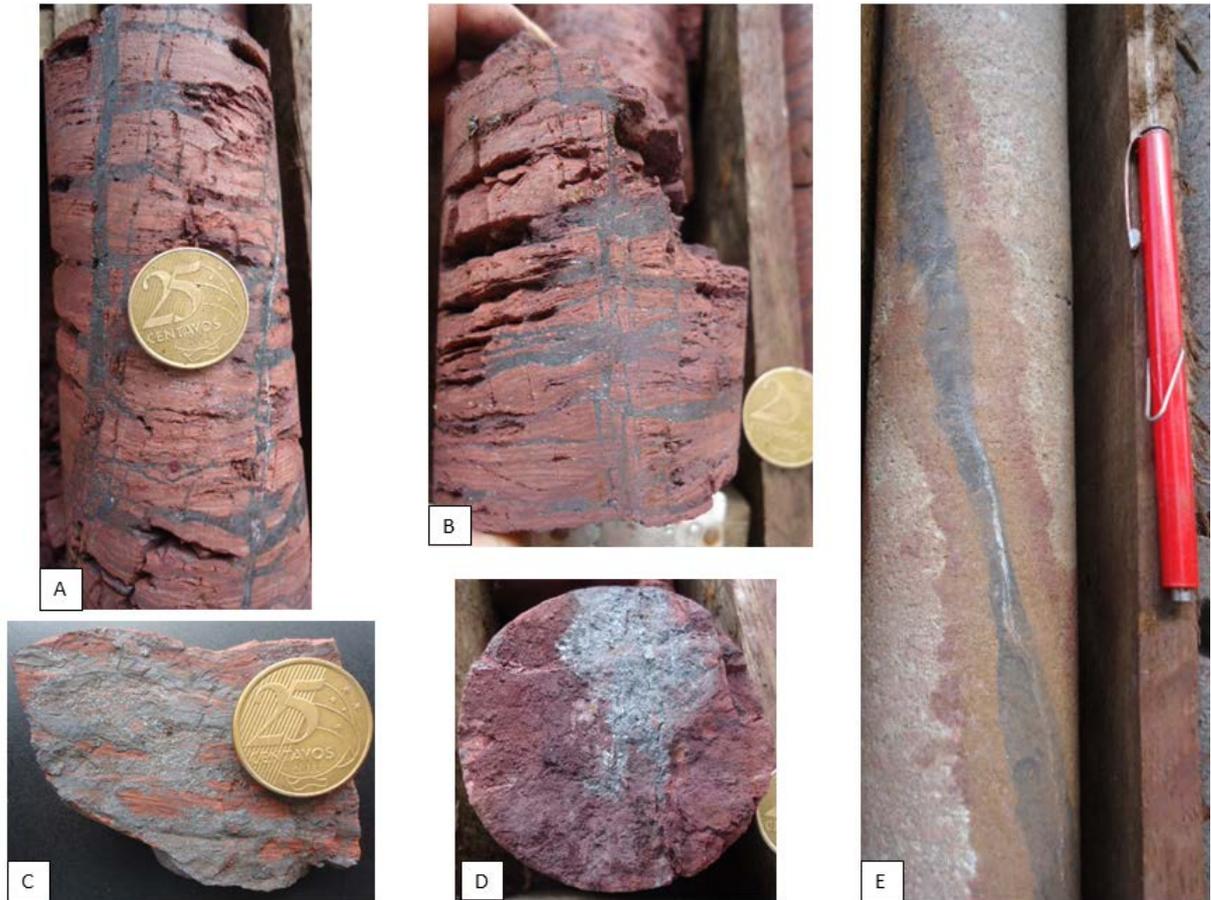


Figura 26 - (A e B) Amostras de testemunho de sondagem (N5W-FD01429) com fraturas preenchidas por hidróxidos de Fe e Mn e quartzo nos jaspilitos. (C e D) Detalhe dos oxi-hidróxidos de Fe e Mn. (E) Oxi-hidróxidos de Fe e Mn e quartzo como vênulas alojadas em fraturas gabro, em que a vênula de quartzo transgride longitudinalmente o veio de hidróxidos de Fe e Mn.

6.2.1 Variações texturais e mineralógicas de veios representativos de OH-Mn e OH-Fe

6.2.1.1 Veio 1

Formado por pirolusita, hematita, hollandita e criptomelana, em proporções extremamente variáveis. A pirolusita perfaz 45% do volume, como cristais euédricos a subédricos, e uma coloração creme sob luz refletida (Figura 27 A). A criptomelana com cerca de 10% em volume é colofórmica, com fibras radiais nas bordas. Ocorre às vezes como massa microcristalina, seccionada por vênulas de igual composição, em duas gerações (Figura 27 C). A hollandita com até 15 % ocorre como pequenos cristais subédricos, pequenos (< 0,1 milímetros), por vezes intercrescidos com pirolusita (Figura 27 B). A hematita dissemina-se na trama de hidróxidos de Mn, não se reconhecendo grãos ou agregados de cristais, perfaz 35% do volume material do veio. Observam-se texturas de substituição, porém não foi possível definir qual foi o mineral substituído. Quartzo microcristalino está presente em menor proporção (Figura 27 D).

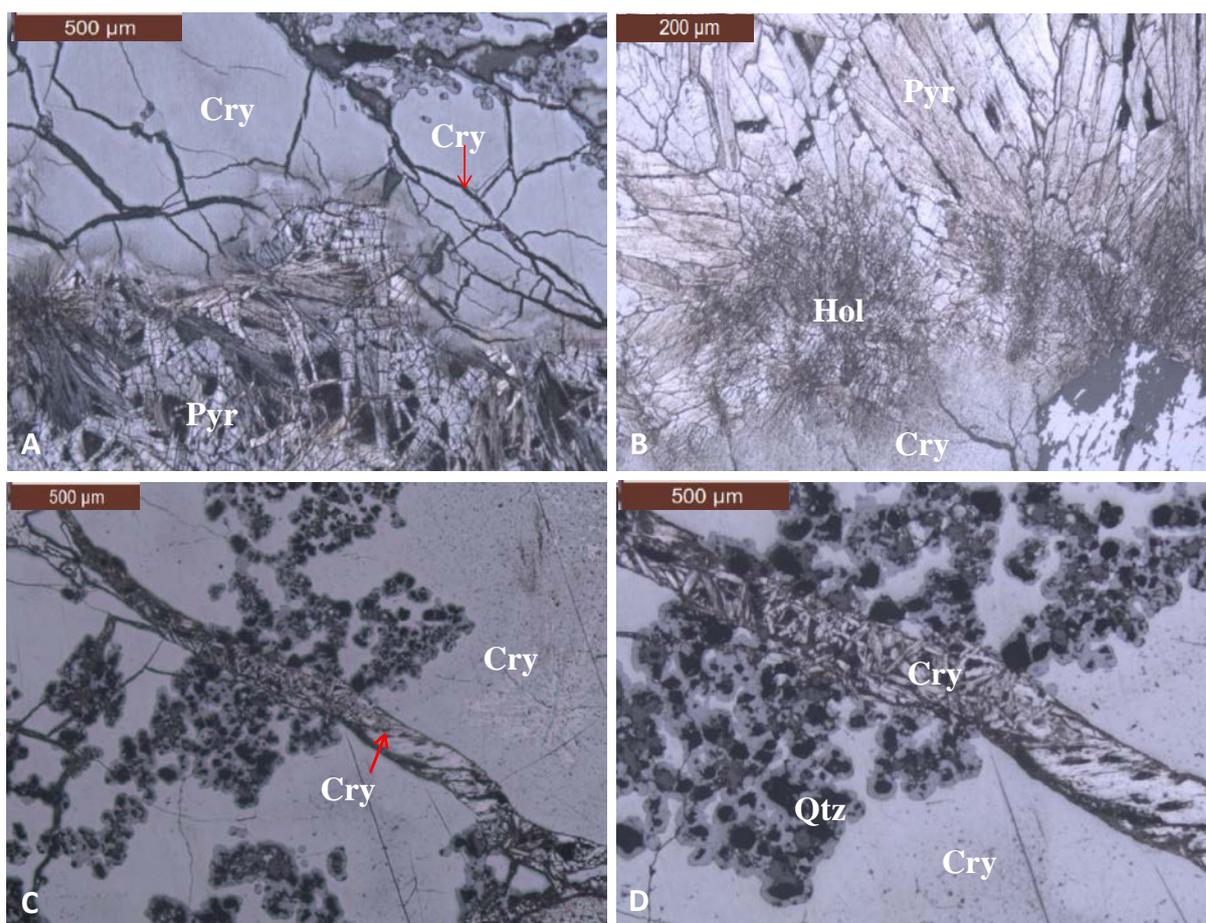


Figura 27 – Fotomicrografias obtidas a partir de lâmina polida sob o microscópio ótico. (A) Massa de criptomelana (Cry) intercaladas com cristais prismáticos de pirolusita (Pyr). (B)

Bandas concêntricas submilimétricas de hollandita (Hol) acicular intercaladas com cristais prismáticos de pirolusita (Pyr) e massa de criptomelana (Cry). (C) Massa de criptomelana seccionada por vênula de criptomelana, indicando mais de uma geração deste mineral. (D) Detalhe da vênula de criptomelana (Cry) e cristais de quartzo (Qtz) envoltos por uma massa de criptomelana.

6.2.1.2 Veio 2

Constituído também por hematita, pirolusita, hollandita, braunita, e criptomelana. A textura é holocristalina, com cristais euédricos e anédricos, em tamanhos variados. Pequenas cavidades presentes, cerca de 1 a 3 mm, estão preenchidas parcialmente por cristais de hematita e criptomelana.

6.2.1.3 Veio 3

Veio constituído por hematita, braunita e criptomelana. A hematita ocorre como cristais lamelares em matriz microcristalina de criptomelana (Figura 28 A e B). A criptomelana ocorre com textura de intercrescimento cristalino com a braunita, onde substitui esses cristais (Figura 29).

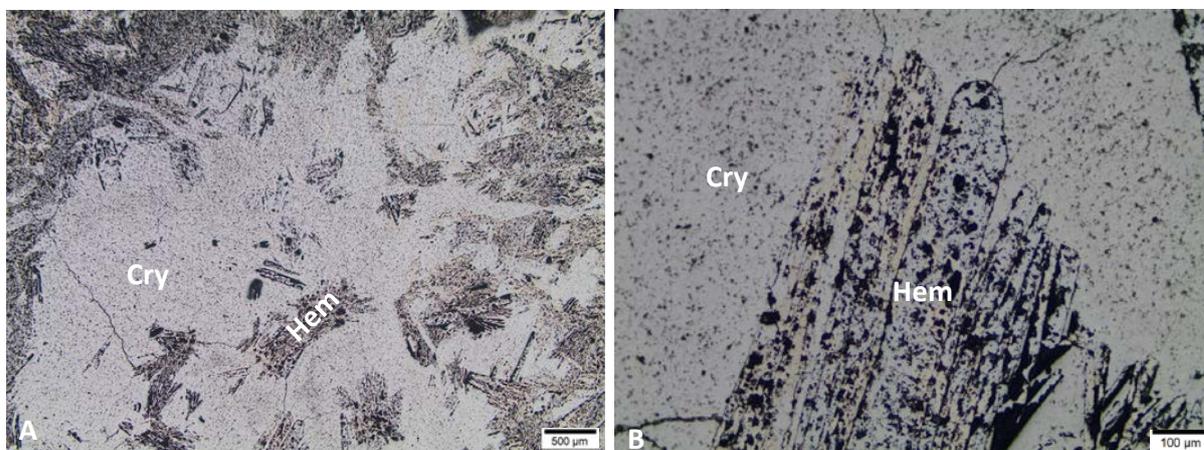


Figura 28 - (A) Fotomicrografia (lâmina polida) mostrando a textura microcristalina da criptomelana (Cry) envolvendo os cristais lamelares de hematita (Hem). (B) Detalhe da textura microcristalina da matriz de criptomelana (Cry) envolvendo os cristais lamelares ou tabulares de hematita (Hem).

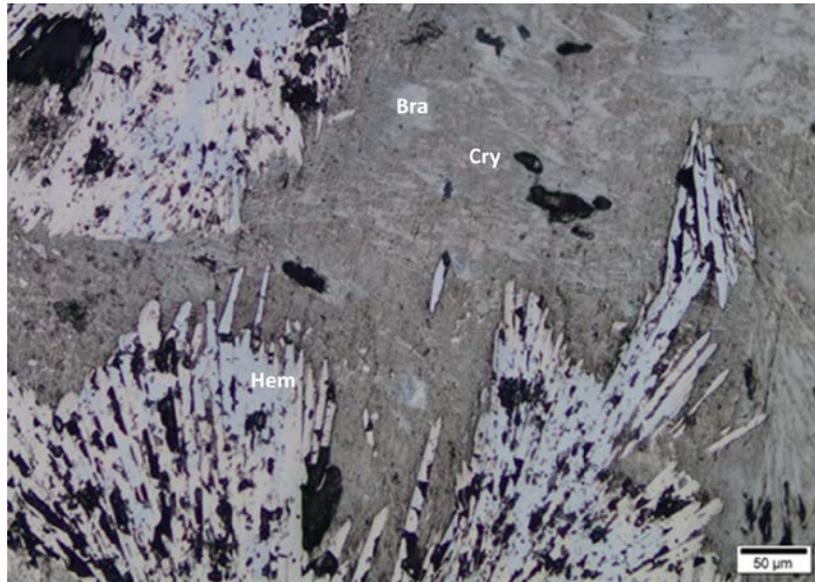


Figura 29 - Fotomicrografia (lâmina polida) em que cristais tabulares radiais de hematita (Hem) estão envoltos por massa de criptomelana (Cry) e braunita (Bra).

6.2.2 Minerais Oxi-hidróxidos de Manganês

6.2.2.1 Pirolusita

A pirolusita é entre os minerais de manganês identificados em N5W, o mais abundante, que se apresenta desde microcristalina à cristalina, quando é tabular. Apresenta-se em coloração cinza claro, fraturada e geralmente ocorre associada com hollandita e braunita (Figura 30). Encontra-se em íntimo intercrescimento com a hollandita, bem como com quartzo microcristalino. Nas bordas, às vezes, ocorre alteração da pirolusita para criptomelana. A hollandita é o segundo mineral mais frequente. Apresenta cor cinza amarronzado a amarelado e assim como a pirolusita apresenta fraturada, porém em menor proporção. A braunita ocorre na cor cinza claro a branco, com menor reflectância do que a pirolusita e principalmente pelo aspecto mais límpido dos cristais, devido a menor alteração/substituição por criptomelana. A hematita apresenta cor cinza amarronzada com cristais lamelares e ocorrem preenchendo cavidades.

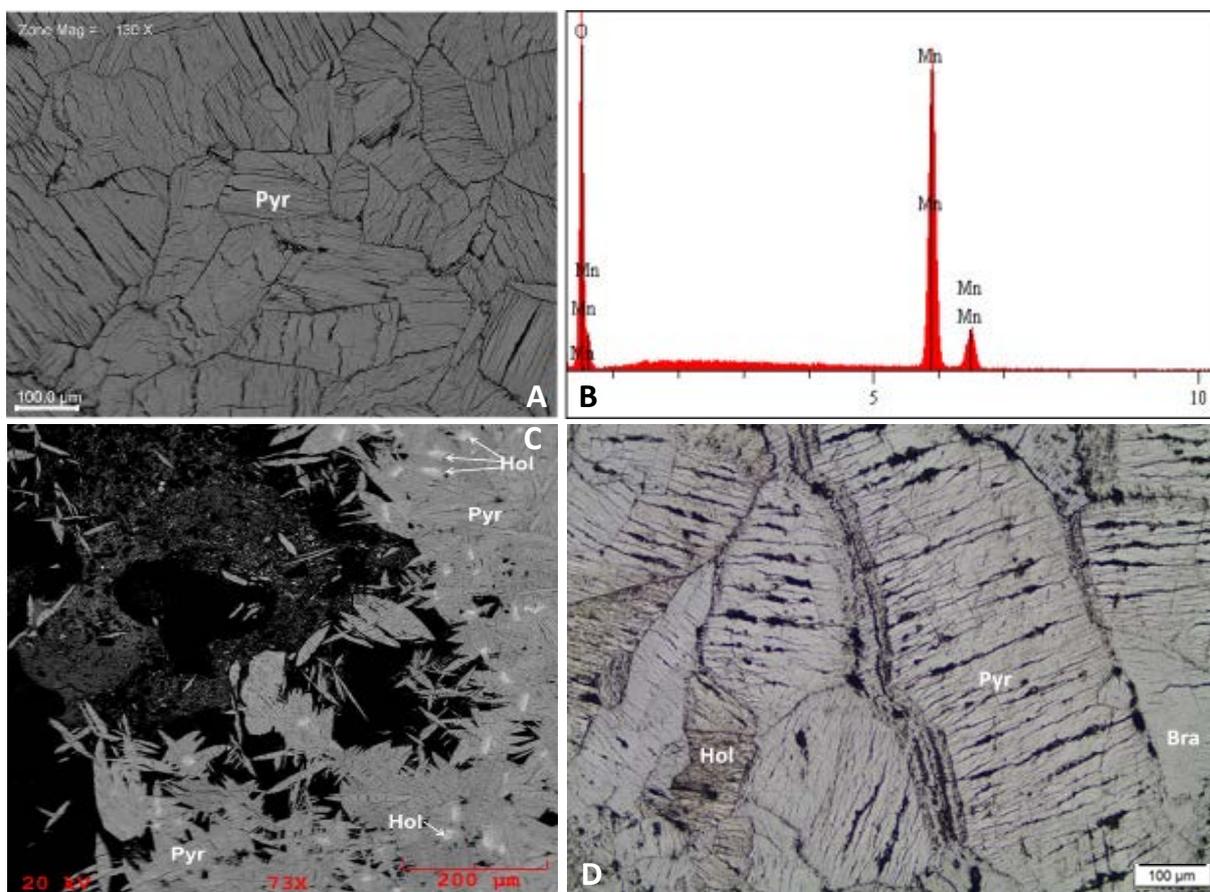


Figura 30 – (A e B) Cristais de pirolusita tabular com seu espectro analítico obtido com MEV/EED, elétrons retroespalhados; (C) Agregados tabulares de pirolusita (Pyr) com

hollandita (Hol) (indicada pelas setas brancas). MEV, elétrons retroespalhados; (D) Fotomicrografia de cristais de pirolusita (Pyr), hollandita (Hol) e braunita (Bra), fraturadas.

6.2.2.2 Criptomelana

Encontra-se frequentemente associada com pirolusita (Figura 31 A). Apresenta-se como agregados micrométricos de hábito graminoso ou em agregados de cristais aciculares intercrescidos com pirolusita (Figura 31 B). É nítida a criptomelana criptocristalina seccionada por vênulas de mesma composição, portanto duas gerações deste mineral (Figura 31 C e D).

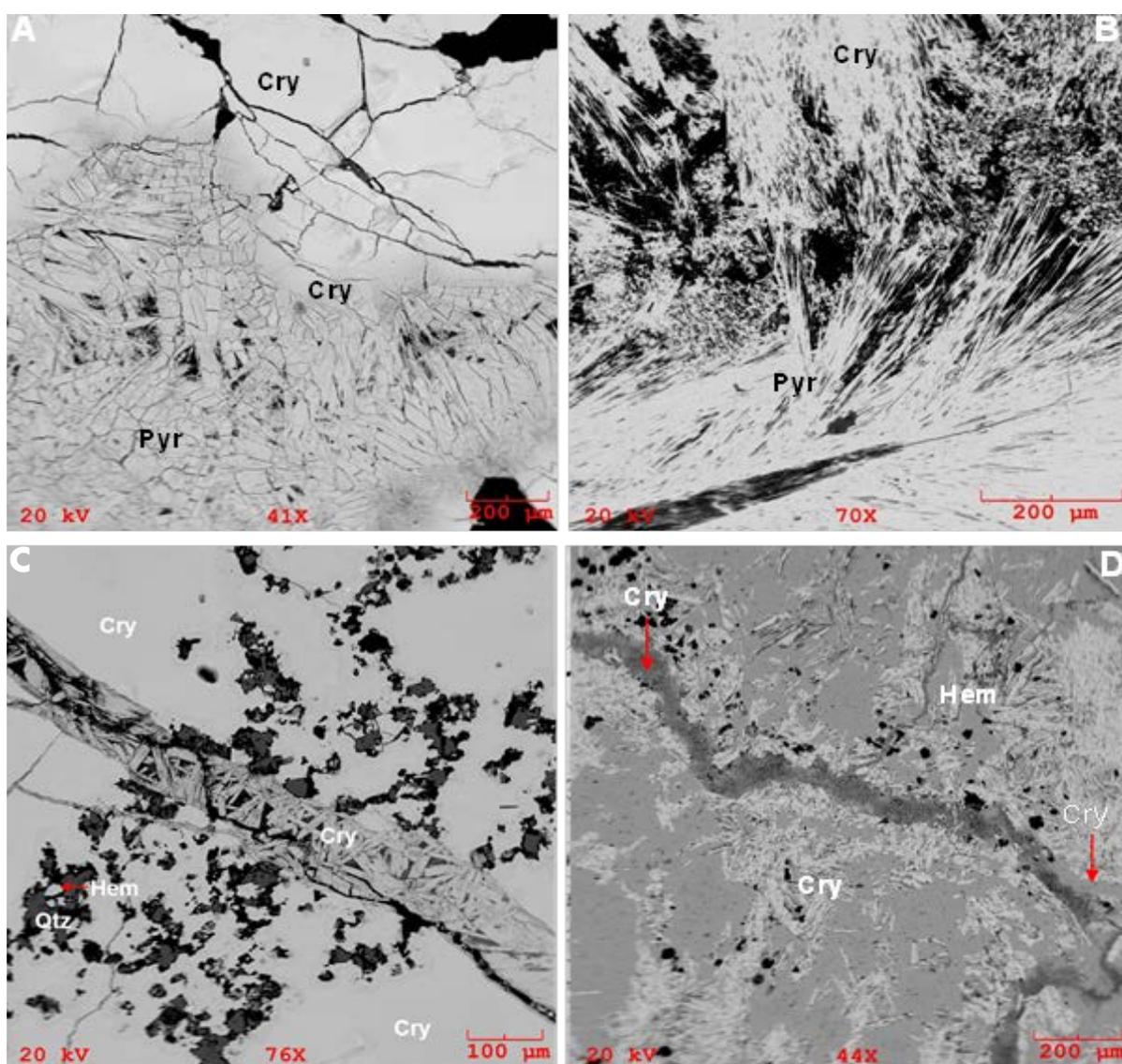


Figura 31 - (A) Micrografias mostrando massas de criptomelana (Cry) e cristais prismáticos tabulares de pirolusita (Pyr). (B) Cristalitos em hábito acicular de criptomelana (Cry) e pirolusita (Pyr) intercrescidos em treliça. (C) Massas de criptomelana (Cry) seccionadas por

vênulas de criptomelana (Cry). (D) Criptomelana microcristalina seccionada por vênulas de mesma composição. MEV, elétrons retroespalhados.

6.2.2.3 Hollandita

A hollandita em geral substitui os cristais de pirolusita, mas também vênulas de pirolusita seccionam hollandita acicular (Figura 32).

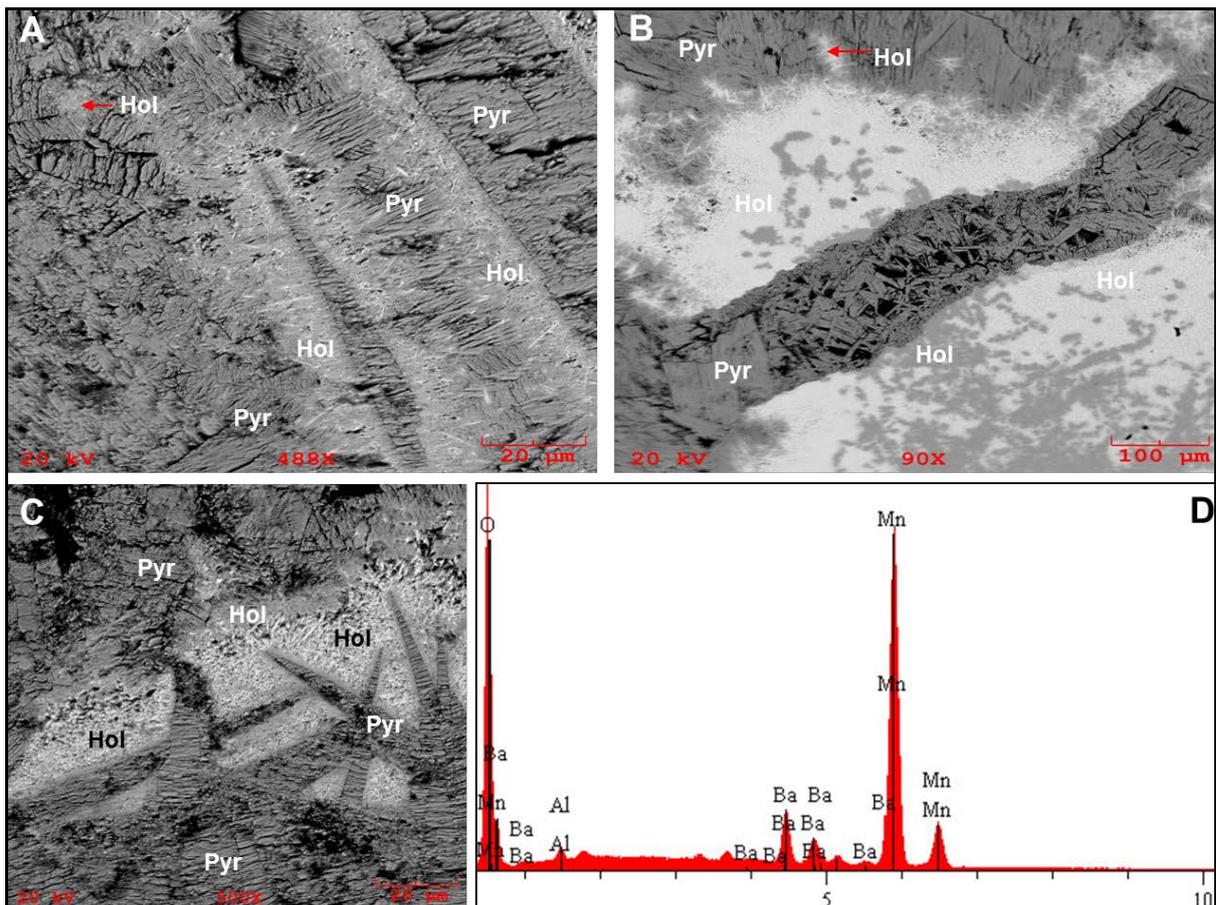


Figura 32 - Vênula de pirolusita (Pyr) seccionando cristais microcristalinos de hollandita (Hol). (C) e (D) Hollandita acicular em contato com cristais tabulares de pirolusita e seu respectivo espectro analítico obtido com MEV/EED. MEV, elétrons retroespalhados.

Bixbyita, calcofanita, ramsdelita e braunita foram identificados apenas através da Difração de Raios-X, conforme observados na Figura 25 e Tabela 2.

6.2.3 Minerais Oxi-hidróxidos de Ferro

6.2.3.1 Hematita

No domínio dos oxi-hidróxidos de Fe a hematita é o principal mineral e em geral se lamelar nas massas de criptomelana ou agregados de criptomelana (Figuras 33).

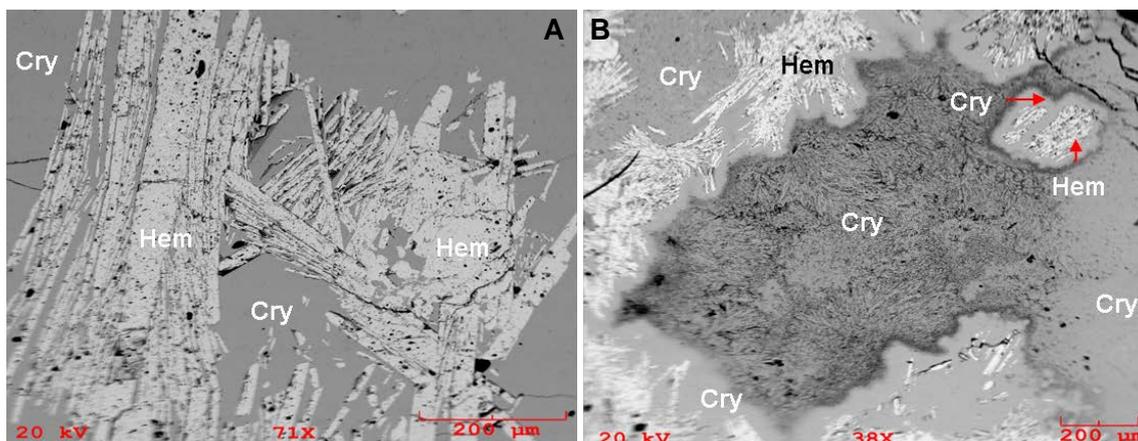


Figura 33 – (A) Criptomelana (Cry) criptocristalina com cristais lamelares de hematita (Hem). (B) Agregados de criptomelana com hematita lamelar. MEV, elétrons retroespalhados.

6.2.3.2 Magnetita

Octaedros sugestivos da presença de magnetita ocorrem com certa frequência, mas normalmente foram substituídos por hematita, sugestivo de martitização (Figura 34). Esses cristais podem ser observados entre hematitas lamelares, quartzo e criptomelana (Figura 35).

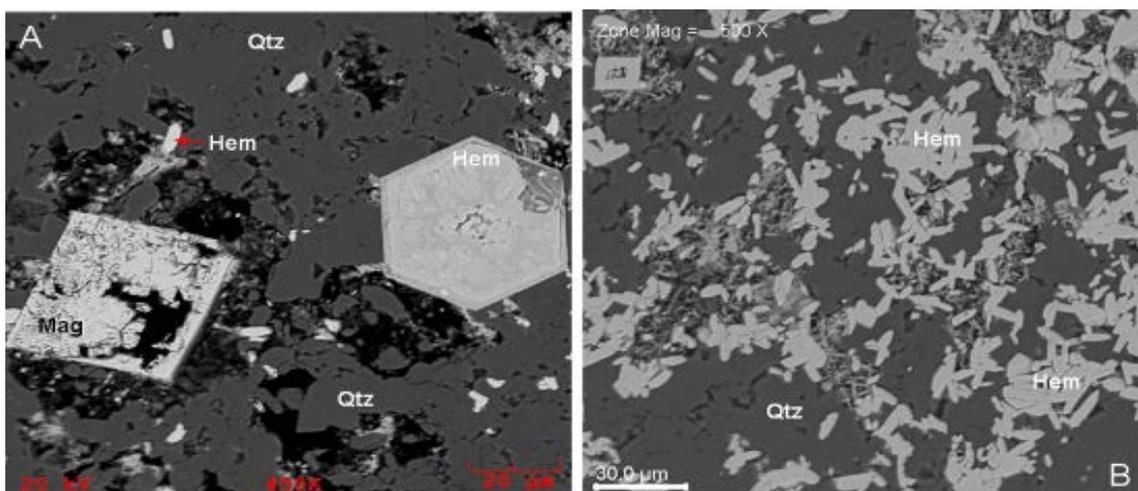


Figura 34 – (A) Magnetita (Mag) em raros cristais octaédricos e hematita (Hem) prismática hexagonal. (B) cristais de hematita lamelar intercrescida com quartzo. MEV, elétrons retroespalhados.

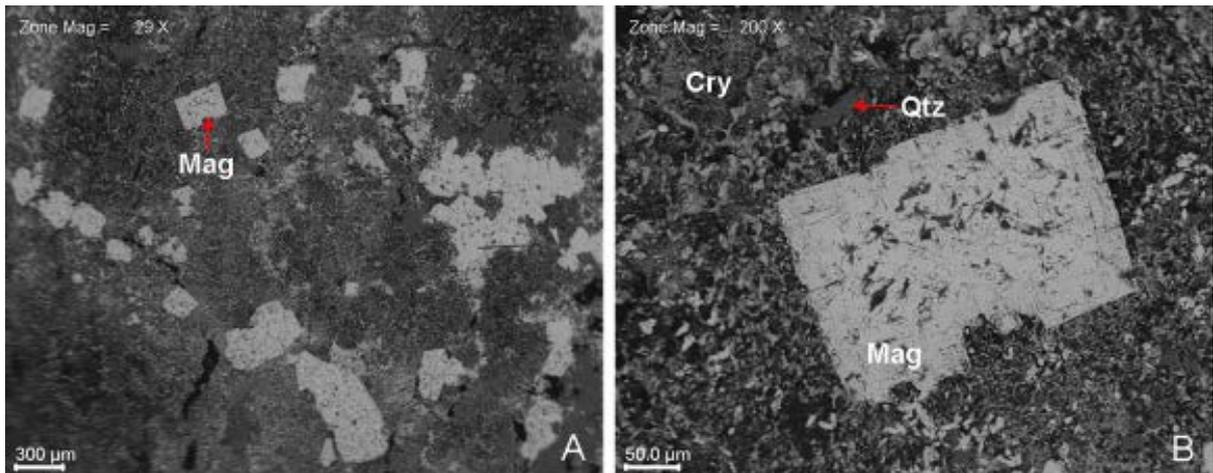


Figura 35 - (A) Cristais octaédricos de magnetita (Mag) “maritizada” envoltos por hematita (Hem) lamelar muito fina e quartzo (Qtz). (B) Detalhe da imagem anterior. MEV, elétrons retroespalhados.

6.2.3.3 Goethita

A goethita geralmente se apresenta com aspecto coloforme e está substituindo a magnetita (Figura 36).

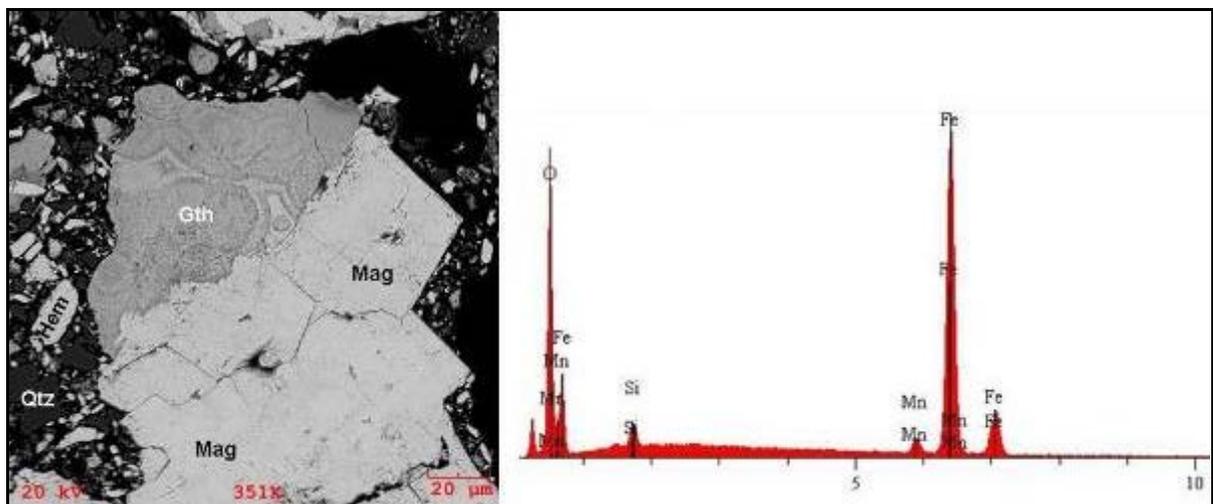


Figura 36 - Goethita (Gth) substituindo magnetita (Mag) e seu respectivo espectro analítico obtido com MEV/EED. MEV, eletros retroespalhados. A composição sugere a presença de oxi-hidróxidos de Mn e quartzo (Qtz).

6.3 INTERPRETAÇÕES AMBIENTAIS A PARTIR DOS OXI-HIDRÓXIDOS DE Fe E Mn ASSOCIADOS

Minerais de manganês na forma de oxi-hidróxidos, como todorokita, litioforita e nsutita geralmente são encontrados como produto de alteração intempérica laterítica, a exemplo da mina de Mn do Azul (Costa et al., 2006). Esses minerais não foram observados na mina de N5W. Por outro lado braunita, bixbyita, calcofanita, ramsdellita e ainda criptomelana (menos característica) foram identificados na mina N5W, quase sempre associados à hematita, hematita tabular e pseudomorfos de magnetita octaédrica. Esses minerais de Mn são mais categóricos de ambiente hidrotermal (Nicholson, 1992; Gutzmer & Beukes, 1996; Hein et al., 1997). Esses minerais nesses ambientes normalmente são encontrados como vênulas, veios e preenchendo espaços de fraturas, como observado em N5W. Por outro lado pirolusita, hollandita e criptomelana, comuns em N5W, podem ser formados durante o intemperismo. No entanto a criptomelana é mais característica de sequência sedimentar, também encontrada na mina de Mn do Azul, nas lentes primárias do minério de manganês (Costa et al., 2006). Espessartita, típica de metamorfismo de baixo grau de sequência pelíticas manganésíferas (Costa et al., 2006) não foi identificada, mostrando que o pacote não sofreu metamorfismo. Portanto as assembleias de minerais de oxi-hidróxidos de Mn de N5W indicam que os mesmos tanto podem ser de origem tipo hidrotermal, associados às vênulas e veios em zona de falhas, como em parte sedimentar indicada por parte da criptomelana maciça, e também intempéricos assinalados por parte da pirolusita e parte da criptomelana + hollandita. Essas assertivas estão de acordo com os principais modos de ocorrências desses minerais na mina: zonas de falhas e fraturas, possíveis lentes e pacote de hematita friável, correspondente à zona saprolítica derivada do jaspilito.

Tabela 3 - Principais minerais de manganês identificados em N5W e sua relação genética.

Mineral	Fórmula química	Origem
Pirolusita	$Mn^{4+}O_2$	Supergênico e hidrotermal (1, 2)
Bixbyita	$(Mn, Fe)_2O_3$	Hidrotermal (1, 3)
Criptomelana	$K(Mn^{3+}, Mn^{4+})_8O_{16}$	Supergênico e hidrotermal (1)
Hollandita	$Ba(Mn^{2+}, Mn^{4+})_8O_{16}$	Supergênico (1), metamórfico/hidrotermal (3)
Braunita	Mn_7SiO_{12}	Hidrotermal (1), diagenético-metamórfico (3)
Calcofanita	$ZnMn_3O_7 \cdot 3H_2O$	Hidrotermal e supergênico (1)
Ramsdellita	$Mn^{4+}O_2$	Hidrotermal (?)

(1) Nicholson (1992); (2) Hein et al. (1997); (3) Gutzmer & Beukes (1996).

6.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química atende o minério de ferro (hematita friável) com manganês, materiais dos veios de oxi-hidróxidos de Fe e Mn e rocha máfica decomposta com Mn.

6.4.1 Elementos Maiores

Os resultados obtidos para os materiais representativos das unidades aflorantes na mina N5W (Tabela 4) ilustram quão variável é sua composição química em termos de Fe_2O_3 , MnO, SiO_2 e Al_2O_3 , que são os componentes químicos, cujos teores se encontram em geral acima de 1,00%, que somados constituem a quase totalidade química. O diagrama $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO}$ (Figura 37) ressalta muito bem essa grande variação química. As concentrações de Fe_2O_3 variam de 9,00 a 96,00 %, e geralmente esses valores estão em correlação negativa com aqueles de MnO e SiO_2 , cujos teores são fundamentais para classificação dos materiais como minérios de ferro e os seus contaminantes. Esses teores de ferro se encontram na forma apenas de hematita, de longe o dominante, goethita e magnetita. Os teores de MnO nas amostras investigadas variaram de 1,14 a 61,74 % e como citado, mostram forte correlação negativa com o Fe_2O_3 (Figura 37), enquanto com SiO_2 não há qualquer correlação, sugerindo que os teores de MnO possam ser tanto primário (sedimentar e hidrotermal) quanto secundário (laterítico), que se enriqueceu ao lado do minério de ferro principal. As amostras com os teores mais elevados de manganês foram encontradas principalmente nos veios instalados em fraturas. Esses teores MnO se dividem com os vários minerais de Mn identificados e apresentados.

Entre os metais alcalinos e alcalinos terrosos analisados apenas K_2O apresenta teores significativos, variando de 0,01 a 0,78%, sendo que os valores mais altos encontram-se relacionados com os mais altos de MnO, provavelmente retratando a presença de criptomelana, pois não foram identificados outros minerais de K. Os teores de MnO respondem também pelos seus outros minerais já identificados como pirolusita, hollandita, braunita, bixbyita, calcofanita e ramsdelita. Esses valores de MnO são anômalos perante aos teores médios encontrados nas formações ferríferas e no minério de ferro de Carajás (0,06%, segundo Macambira, 2003; 0,02% segundo Meireles, 1986). Aparentemente não há uma relação entre os tipos de minério de ferro com os teores de Mn, mas segundo Costa (2006) a maioria dos minérios de Fe a hematita friável em Carajás apresentam teores muito baixos de MnO, porém localmente atinge 5,69 %.

Os teores de Al_2O_3 ficam entre 0,16 e 6,23 %, mas principalmente entre 0,16 e 1,00%. Já os teores de TiO_2 estão categoricamente na ordem de 0,01%, muito baixos, exceto na amostra MN-22 com 1,03 %, que também corresponde a amostra com maior teor de Al_2O_3 (6,23%), de P_2O_5 (0,28%) e de PF (7,1%) e até mesmo de MnO (11,97%). E por outro lado com os teores mais baixos de SiO_2 (0,77). Isto permite concluir que a amostra seja formada, além de hematita e goethita, por gibbsita, fosfato de alumínio (augelita), anatásio e oxihidróxidos de Mn, em parte confirmado pelas análises de DRX. Essa amostra foi confundida em campo com máfica intemperizada. De fato deve corresponder a uma rocha mais aluminosa transformada em crosta ferroaluminosa. Vale frisar que os teores de P_2O_5 (%) no geral encontram-se abaixo de 0,05 %, principalmente a 0,01%, característica química muito crítica para os minérios de ferro, em que os teores de P devem ficar nesta ordem de grandeza. Os teores de SiO_2 se apresentam nas amostras estudadas entre 0,76 e 47,21 %, a maior parte está abaixo de 5,00. Os valores mais altos correspondem às amostras de formações ferríferas bandadas (jaspilitos), o protominério, que em consequência apresentam os teores mais baixos de Fe_2O_3 . Esses teores de SiO_2 encontram-se como quartzo microcristalino.

Tabela 4 - Resultados das análises químicas das amostras investigadas, tanto para os elementos maiores (como óxidos), menores e traços.

(Continua)

AMOSTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F	As	Mn	Ba	Sr	Be	Bi	Cd	Co	Cs	Cu	Ga
MN-04	1.48	0.96	35.9	48.93	0.01	0.01	0.05	0.66	0.01	0.02	11.5	2.9	37.68	2244	70	2	<0,1	2.2	38.7	<0,1	915.6	36.0
MN-05	43.34	0.16	50.44	3.5	0.07	0.09	0.01	0.15	0.01	0.01	2.1	1.5	2.70	992	182	<1	<0,1	0.5	16.1	0.1	472.3	13.1
MN-06	21	0.19	75.71	2.03	0.04	0.02	0.01	0.07	0.01	0.01	0.9	1	1.56	181	38	<1	<0,1	0.1	3.2	<0,1	151.9	8.5
MN-07	0.82	0.72	14.27	61.74	0.02	0.12	0.01	0.16	0.01	0.01	10.8	31.1	47.54	10734	465	5	<0,1	3.1	62.2	<0,1	2739.2	60.2
MN-08	47.21	0.22	41.59	4.96	0.11	0.04	0.01	0.3	0.01	0.02	5.5	5	3.82	113	45	1	<0,1	0.4	8.5	<0,1	147.5	19.8
MN-09	26.7	0.37	9.05	46.01	0.02	0.05	0.01	0.05	0.01	0.14	8.6	6.2	35.43	1272	72	4	<0,1	1.3	53.9	<0,1	2527.2	63.0
MN-10	2.53	1.6	91.07	2.74	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	1.8	18.6	2.11	291	13	<1	1.6	0.6	14.4	<0,1	285.0	23.3
MN-11	6.91	0.65	48.59	34.56	0.01	0.03	0.05	0.78	0.01	0.01	7.9	2.9	26.61	2555	177	2	<0,1	4.2	82.5	<0,1	1125.2	25.3
MN-12	27.48	0.59	15.97	41.42	0.01	0.01	0.01	0.33	0.01	0.01	7.5	1.6	31.89	1988	81	4	<0,1	6.3	25.8	<0,1	1464.6	58.4
MN-14	27.23	5.58	50.32	9.74	0.11	0.1	0.01	0.28	0.01	0.03	5.6	2.6	7.50	6368	194	<1	0.7	4.3	290.6	0.2	779.7	26.0
MN-15	1.61	0.17	96.17	1.14	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.7	1.4	0.88	222	14	<1	<0,1	0.1	3.9	0.4	88.2	12.7
MN-16	1.4	0.28	95.96	1.22	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	1	2.5	0.94	1073	22	2	<0,1	0.2	11.7	0.3	70.2	10.0
MN-17	22.87	0.43	66.37	6.66	0.12	0.03	0.01	0.18	0.01	0.01	3.2	0.8	5.13	501	68	<1	0.2	0.9	10.7	0.2	406.2	10.4
MN-18	5.57	0.98	88.68	3.06	0.01	0.03	0.01	0.07	0.02	0.01	1.3	3.5	2.36	2011	93	2	<0,1	0.4	18.7	0.2	132.0	9.7
MN-19	6.9	0.26	89.45	2.37	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1	2.1	1.82	196	10	4	<0,1	0.2	2.1	0.2	46.8	27.3
MN-20	1.68	0.39	93.14	2.71	0.05	0.03	0.01	0.05	0.01	0.01	1.8	1.8	2.09	244	24	<1	7.0	0.2	13.6	0.2	581.6	6.0
MN-21	1.15	0.27	96.06	1.29	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	1.1	1.5	0.99	126	6.5	<1	0.3	<0,1	6.3	0.4	205.6	0.5
MN-22	0.76	6.23	70.78	11.97	0.01	0.01	0.01	0.07	1.07	0.28	7.1	5.7	9.22	12119	82.9	<1	0.4	1	197.8	0.2	1048.4	28.3
MN-24	0.27	0.75	90.4	5.71	0.01	0.02	0.01	0.06	0.01	0.01	2.1	7.2	4.40	5004	34.3	2	0.8	0.9	23.4	0.3	833	10
MN-26	0.49	0.52	93.44	3.69	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.01	1.5	3	2.84	2386	17.6	<1	0.2	0.5	11.1	0.1	176.3	6
MN-27	1.46	0.39	93.82	2.84	0.04	0.02	0.02	0.06	0.01	0.02	1.8	0.5	2.19	303.2	19.2	0.4	0.03	1.1	10.6	0.04	159.51	3.3
MN-28	5.25	0.39	81.03	10.67	0.02	0.03	0.03	0.16	0.01	0.03	2.18	0.6	8.22	594.6	60	1	0.07	5.01	24.3	0.02	428.53	4.3
MN-29	1.61	0.6	87.65	6.11	0.03	0.01	0.03	0.06	0.01	0.05	4.61	0.7	4.70	137.8	29.3	0.4	0.07	0.21	11.5	<0,02	111.84	4.3
MN-30	1.24	0.84	86.23	6.29	0.03	0.01	0.03	0.12	0.01	0.04	5.09	0.3	4.84	660.7	18.8	0.1	0.05	0.46	11.9	<0,02	154.17	4.2
MN-31	0.97	0.33	93.96	2.56	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	2.77	0.2	1.97	39.3	14.8	0.3	0.07	0.09	5.1	<0,02	101.96	3.7
MN-32	0.94	0.51	77.52	16.32	0.04	0.01	0.02	0.04	0.01	0.05	3.43	2	12.57	817.4	18.7	0.5	0.14	0.16	10.9	<0,02	362.28	4.7
MN-33	2.3	0.58	91.83	3.5	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.04	2.28	0.9	2.70	170.3	22.5	<0,1	0.1	0.08	9	<0,02	53.88	3.5
MN-34	1.11	0.45	92.8	4.09	0.11	0.03	0.03	0.11	0.01	0.04	2.1	0.9	3.15	652.5	61.8	0.2	0.04	1.23	15.3	0.05	252.75	3.4
MN-35	0.93	0.4	88.18	6.22	0.15	0.03	0.01	0.23	0.01	0.07	3.26	3.4	4.79	1500.2	149.4	0.6	0.23	2.39	17	0.09	720.11	3.3
MÉDIA	9.07	0.89	72.63	12.21	0.05	0.02	0.01	0.14	0.04	0.03	3.81	3.88	9.40	1913.66	72.52	1.75	0.71	1.36	34.86	0.19	570.40	16.87
MC	64.9	14.6	4.40	0.07	2.24	4.12	3.46	3.45	0.52	0.15	-	2.00	-	668.00	316.00	3.00	0.12	0.10	11.60	5.80	14.30	14.00
CKS	44.6	0.63	53.65	0.06	0.1	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01	0.73	-	-	29.73	-	-	6.20	-	11.10	-	29.79	21.16

Tabela 4 - Resultados das análises químicas das amostras investigadas, tanto para os elementos maiores (como óxidos), menores e traços.**(Conclusão)**

AMOSTRA	Hf	Mo	Nb	Ni	Rb	Sb	Sc	Se	Sn	Ta	Th	U	V	W	Y	Zr	Pb	Zn	Au	Ag	Hg	Tl
MN-04	<0,1	6.9	<0,1	8.5	5.4	0.2	6	0.9	<1	<0,1	<0,2	7.6	<8	1.3	30.3	0.7	98.1	253	0.017	88.9	0.88	2.8
MN-05	<0,1	0.7	0.2	3.5	2.2	<0,1	<1	<0,5	<1	<0,1	<0,2	28.9	<8	6.6	2.6	0.6	0.9	41	0.001	0.6	<0,01	<0,1
MN-06	<0,1	0.7	<0,1	2.1	1.5	<0,1	<1	<0,5	<1	<0,1	<0,2	1.5	24	16.8	1.0	0.4	0.9	18	0.001	0.1	<0,01	<0,1
MN-07	<0,1	34.1	<0,1	27.9	2.0	<0,1	<1	0.9	<1	<0,1	<0,2	557.6	<8	0.9	57.2	0.3	1.1	494	0.009	33.1	0.11	0.7
MN-08	<0,1	1.7	0.1	18.7	4.6	<0,1	6	0.9	<1	<0,1	<0,2	1.0	33	7.5	51.0	1.4	3.5	148	0.002	1.2	<0,01	<0,1
MN-09	<0,1	10.9	<0,1	51.5	0.9	<0,1	<1	<0,5	<1	<0,1	<0,2	2.1	<8	<0,5	34.6	0.6	1.6	521	0.006	3.0	0.01	0.3
MN-10	<0,1	1.3	<0,1	9.2	0.5	<0,1	<1	1.4	<1	<0,1	<0,2	4.0	951	29.7	5.0	1.1	7.0	32	<0,5	0.4	0.03	<0,1
MN-11	<0,1	5.8	<0,1	5.5	9.2	0.2	5	<0,5	<1	<0,1	<0,2	4.4	<8	6.5	35.1	0.4	23.7	378	0.003	46.7	0.87	1.6
MN-12	<0,1	6.4	0.2	7.2	3.7	<0,1	3	0.6	<1	<0,1	<0,2	4.6	<8	<0,5	23.0	0.5	177.3	301	0.003	34.7	0.32	2.1
MN-14	<0,1	16.3	<0,1	40.5	8.2	0.2	5	0.5	<1	<0,1	<0,2	2.7	25	4.8	32.4	2.7	21.8	311	0.023	19.6	0.10	1.7
MN-15	<0,1	0.6	<0,1	3.7	1.2	0.4	1	<0,5	<1	<0,1	<0,2	1.2	10	1.4	2.0	0.8	4.9	12	0.001	0.6	<0,01	<0,1
MN-16	<0,1	0.8	<0,1	5.9	0.9	1.0	7	<0,5	<1	<0,1	<0,2	1.4	33	1.9	5.4	1.3	11.7	23	0.006	0.4	0.02	0.9
MN-17	0.1	3.9	0.3	9.3	3.3	<0,1	2	<0,5	<1	<0,1	0.5	2.0	<8	2.7	10.3	3.2	14.2	76	0.002	1.2	0.10	<0,1
MN-18	<0,1	1.0	<0,1	5.5	1.7	1.2	6	<0,5	<1	<0,1	0.2	0.9	38	16.8	6.9	3.6	18.4	30	0.004	1.5	0.03	0.3
MN-19	<0,1	0.6	<0,1	3.7	0.8	0.4	<1	<0,5	<1	<0,1	<0,2	1.0	<8	0.6	2.8	1.9	8.8	16	<0,5	0.1	<0,01	<0,1
MN-20	<0,1	0.8	<0,1	8.2	1.9	0.4	2	<0,5	<1	<0,1	<0,2	2.9	28	2.0	7.1	2.5	12.6	15	0.007	3.4	0.03	<0,1
MN-21	<0,1	0.6	<0,1	6.6	1.4	0.4	2	<0,5	<1	<0,1	0.4	0.5	9	3.4	5.7	8.3	10.6	9	0.001	1.2	0.02	<0,1
MN-22	4.9	4.5	7.7	48.4	1.1	0.7	43	<0,5	<1	0.7	8.7	8.2	257	19.5	25.4	204.9	21.8	194	0.066	3.3	0.9	14.8
MN-24	<0,1	4	<0,1	5.3	2.1	0.9	3	<0,5	<1	<0,1	0.3	6.4	60	5.8	12	5	18.7	71	0.002	6.6	0.22	0.6
MN-26	<0,1	17	<0,1	5.8	1.5	0.4	3	<0,5	<1	<0,1	0.3	1.6	24	4.5	8	5.6	7.2	47	0.001	0.8	0.17	0.2
MN-27	<0,02	1.77	0.02	10.4	0.9	0.2	0.6	<0,1	0.7	<0,05	0.1	0.7	4	24.3	2.75	3.3	8.4	59	0.001	16.4	0.01	<0,1
MN-28	<0,02	2.48	0.03	14.1	2.1	0.17	0.9	<0,1	0.4	<0,05	<0,1	0.3	5	28.3	5.03	2	173.9	366	0.074	27.1	<0,01	0.4
MN-29	0.07	1.55	0.06	7.8	0.6	0.18	0.8	<0,1	0.4	<0,05	0.4	0.1	9	18.4	2.15	7.2	11	79	0.005	3.8	0.06	<0,1
MN-30	0.05	1.54	0.06	6.6	1.3	0.1	1.3	<0,1	0.4	<0,05	0.3	0.1	8	16.3	2.28	6.4	22.9	50	0.003	14.6	0.26	0.2
MN-31	0.02	0.88	0.04	6.9	0.2	0.08	0.6	<0,1	0.2	<0,05	0.2	0.1	7	2.2	2.36	4.5	13	25	0.002	0.7	0.05	<0,1
MN-32	0.04	2.42	0.05	4.7	0.5	0.15	0.6	0.1	0.2	<0,05	0.1	0.3	2	0.4	5.48	4.3	12.2	97	0.001	0.9	0.08	<0,1
MN-33	0.04	1	0.04	6.1	0.3	0.13	1.1	<0,1	0.2	<0,05	0.2	0.3	8	0.2	1.88	5.8	6.2	30	0.002	0.9	0.03	<0,1
MN-34	0.04	1.19	0.06	5.8	1.4	0.15	1.4	<0,1	0.2	<0,05	0.1	0.6	12	0.7	3.25	4.5	10.3	61	0.001	1.8	0.05	0.1
MN-35	<0,02	1.19	0.05	9.8	2.5	0.29	2.5	<0,1	0.2	<0,05	<0,1	0.8	21	0.6	5.83	5.4	8.6	162	0.003	2.2	0.03	0.5
MÉDIA	0.66	4.57	0.64	12.04	2.20	0.37	4.51	0.76	0.32	0.70	0.91	22.20	74.67	8.30	13.41	9.97	25.22	135.14	0.01	10.89	0.19	1.81
MC	3.42	1.40	26.00	19.00	110.00	0.03	7.00	0.00	3.00	1.50	10.30	2.50	53.00	1.40	20.70	237.00	17.00	52.00	-	0.05	0.05	0.75
CKS	-	-	-	7.85	-	7.43	0.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.33	16.89	-	-	-	-

Fonte: MC - média crustal, segundo Wedepohl (1995); CKS - média de Carajás, segundo Macambira (2003).

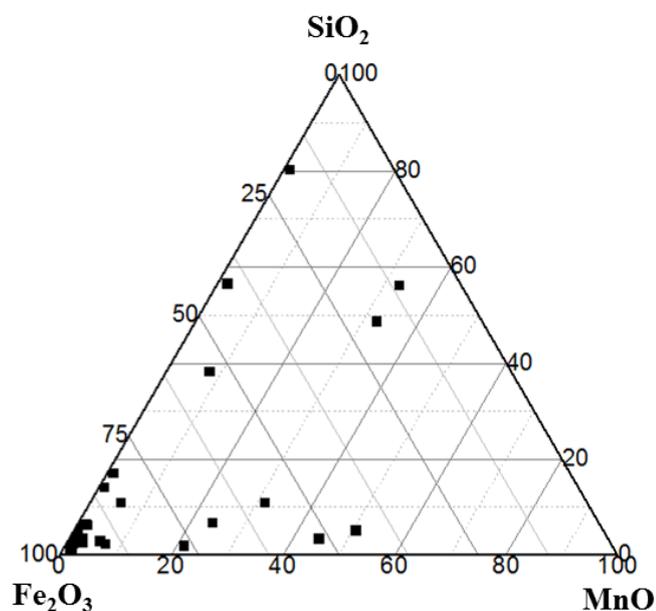


Figura 37 – Diagramas ternário para as concentrações Fe₂O₃-SiO₂-MnO para as amostras de N5W.

O diagrama de dispersão Fe₂O₃-MnO (Figura 38) permite identificar duas populações distintas: uma com teores de MnO > 30,0 e de Fe₂O₃ < 40% representando as amostras provenientes de veios de oxi-hidróxidos de Mn; outra pelas amostras com teores MnO < 30,0% e Fe₂O₃ > 40% com domínio de hematitas friáveis “manganesíferas” (MN-22) (Figura 37), na verdade as hematitas associadas com oxi-hidróxidos de Mn. A presença de manganês nas formações ferríferas em Carajás foi verificada ainda por (Suszczyński, 1972) na região de N2 (Serra Norte) em testemunhos de sondagem. Ele distinguiu na formação ferrífera primária quatro níveis distintos com teores acima de 1,0%.

As análises de clusters (Figura 39) agrupam em mesmo conjunto as amostras muito ricas em MnO (MN-7, MN-4, MN-11), ou seja aquelas relacionadas aos veios, as amostras de minério de ferro (> 80 % Fe₂O₃) com as formações ferríferas, além de isolar a única amostra (MN-22) tipo crosta ferroaluminosa com anatásio e fosfatos de alumínio.

Em termos de teores médios das amostras investigadas, os teores de Fe₂O₃ (50,80 %), de SiO₂ (9,07 %) e de MnO (12,21 %) divergem daqueles apresentados por Lindenmayer (2001) apenas no que concerne aos teores de SiO₂ (40,82 %), assemelhando-se nos de Fe₂O₃ (57,46%), certamente por expressar basicamente as formações ferríferas bandadas primárias. Os teores de SiO₂ encontrados por Lindenmayer (2001) se equivalem também aqueles de Macambira (2003), de 44,60% nas formações ferríferas de Carajás (Tabela 4). Certamente os

teores muito mais baixos de sílica encontrados nas amostras de N5W refletem o minério rico, enriquecido pela lateritização, além das amostras mobilizadas em veios alojados ao longo de fraturas, não se enquadrando como formações ferríferas bandadas típicas (Figura 38). Várias amostras analisadas (Tabela 4) podem ser segundo os teores de SiO_2 e Fe_2O_3 comparadas às formações ferríferas bandadas: MN-05, 08, 12, 14 e 17 (Figura 38).

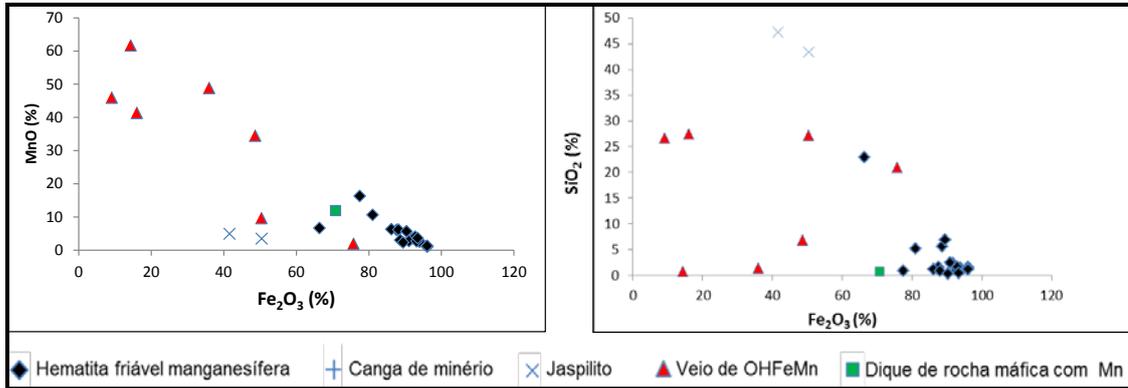


Figura 38 - Diagramas de dispersão para os pares de elementos químicos MnO em relação a Fe_2O_3 e SiO_2 em relação a Fe_2O_3 .

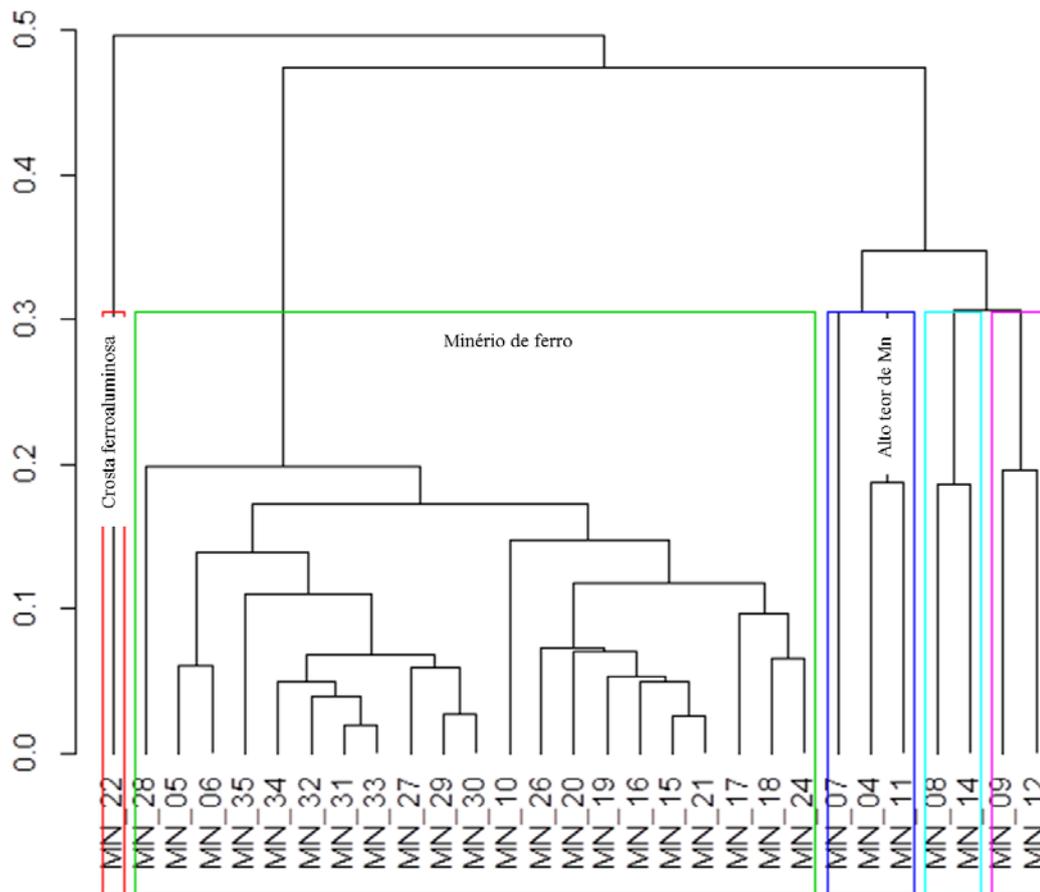


Figura 39 - Dendrograma de similaridade das amostras com base nas análises químicas multi-elementares na mina de ferro de N5W.

6.4.2 Elementos Traços

Da mesma forma como foi indicado pelos elementos maiores, os elementos traços mostram que os diversos materiais, incluindo os minérios de ferro da mina N5W, apresentam grande heterogeneidade em termos de concentração. Se comparados com a média crustal, a divergência é muito grande. Se comparados com BIFs não alteradas há ligeiras semelhanças. Em valores acima da média crustal encontram-se: As, Ba, Cd, Co, Cu, Ga, Mo, Sb, U, V, W, Pb, Zn, Ag, Hg e Tl. Entre estes se destacam principalmente Cu, Mo, Zn e Ag pelos valores elevados mais anômalos. U, V, W, Pb e Tl apresentam valores muito variáveis, se estendendo do limite de detecção a valores muito anômalos. Cu, Mo, Zn e Ag mostram forte correlação positiva com MnO, portanto devem se encontrar em grande parte na estrutura dos minerais de Mn, embora a espécie específica ainda não foi possível precisar. A forte correlação positiva Cu-Zn assegura a forte afinidade geoquímica entre si e com os minerais de Mn (Figura 40). Destacam-se os valores de Cu (MN-07 e MN-09 com 2739 e 2527 ppm, respectivamente) e com os mais altos teores de MnO, de U (MN-07 com 557 ppm) e As (MN-07 com 31 ppm), que apresentou o maior teor de MnO (61 %), típica de veio, possível mobilidade química hidrotermal. As anomalias de W, As e V foram observadas na amostra MN-10, também típica de veios preenchendo fraturas, porém muito rica em Fe₂O₃, em hematita hidrotermal. Os teores de Ba atingem valores muito elevados, até cerca de 12000 ppm, o que confirma a presença da hollandita em várias amostras, mas não apresentam uma correlação direta com os teores de Mn. Isto sugere que os teores de Mn de fato representam vários minerais de Mn, com hollandita associada, da mesma forma como foi demonstrado pela criptomelana. A hollandita segundo os teores de Ba se encontra principalmente nas amostras MN-07, MN-14, MN-22 e MN-24. A amostra MN-21 apresenta o menor conteúdo em Mn, enquanto que a amostra Mn-22 o mais alto em Ba, e portanto em hollandita. A MN-07, a mais rica em MnO, além de hollandita (ca.10.000 ppm de Ba), contém outros oxi-hidróxidos de Mn. Estrôncio se encontra em valores significativos e apresenta forte correlação com Ba e desta forma deve se encontrar na estrutura da hollandita, fato comum neste mineral.

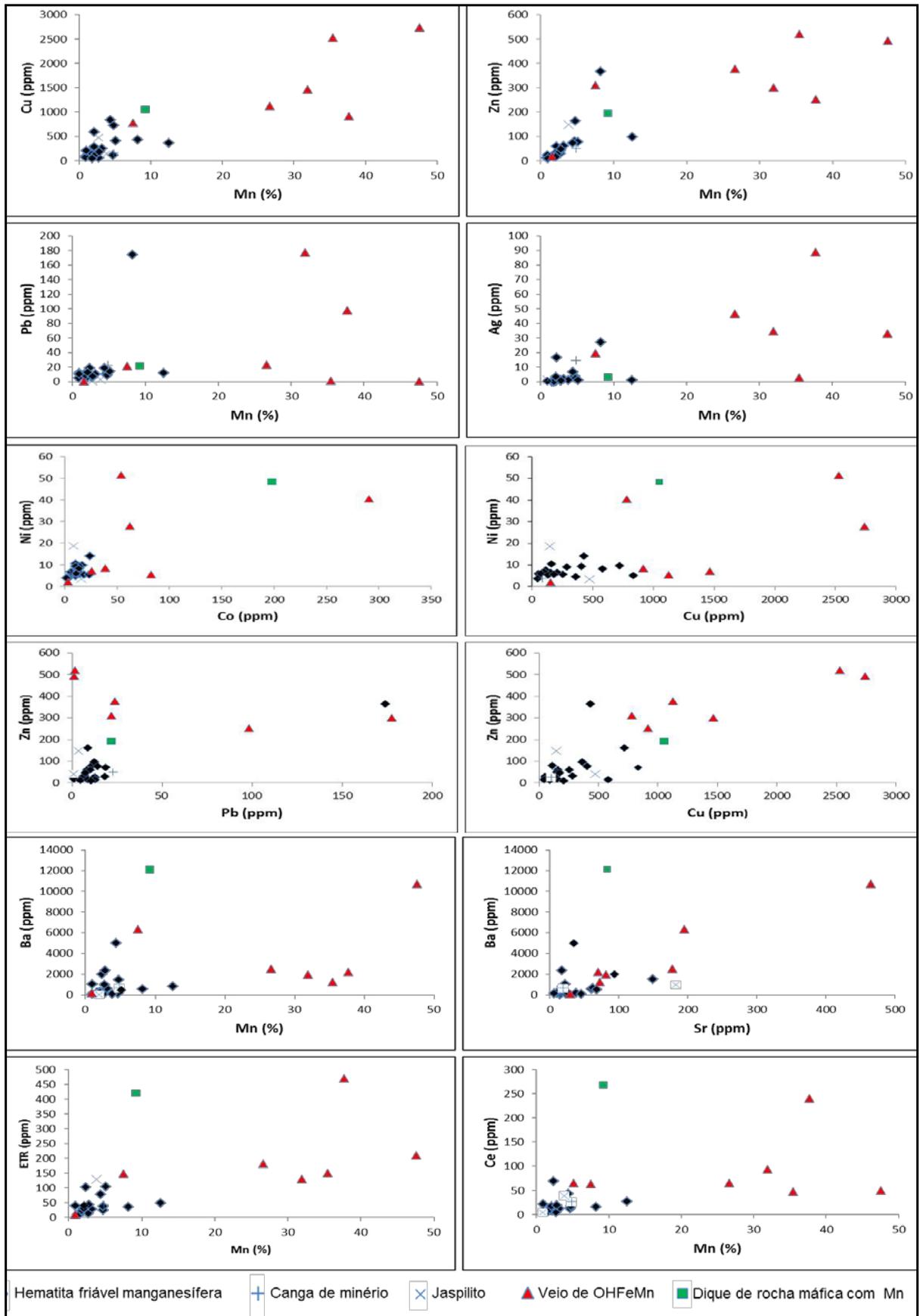


Figura 40 – Diagramas de dispersão química nas amostras da mina N5W.

Pelo exposto foi possível definir uma associação geoquímica formada por elementos de relativa mobilidade constituída principalmente por Ba, Sr, As, Cd, Co, Cu, Mo, Sb, Zn e Ag para o minério de ferro manganésífero de N5W, com destaque para Ba, Sr, Cu, Zn e Ag. Esta seria a assinatura geoquímica do minério de ferro manganésífero de N5W. Ainda se destaca valores anômalos isolados de Y, U, V, W, Pb, Hg e Tl, que ocorrem principalmente na amostra MN-22, a única que contém anatásio, fosfato e alto teor de Fe_2O_3 e MN-10 com hematita, quartzo, bixbyita e braunita.

Por outro lado as amostras investigadas de minério de ferro manganésífero se destacam pela grande pobreza em elementos químicos refratários como Zr, Hf, Nb, Ta, Sc, Sn e Th, além de Rb, a maioria próximo ao limite de detecção do método (Tabela 3), portanto abaixo de 1 ou 0,1 ppm, exceto Zr e Rb em dezenas de ppm. Desta forma Zr-Hf-Nb-Ta-Sc-Sn-Th constituem a outra associação típica, pela pobreza de seus constituintes. O Rb localmente se resalta com os teores mais elevados de K em função da presença de criptomelana, de fato se correlaciona positivamente com K_2O .

As concentrações de ETR nas amostras estudadas são relativamente baixas, muito abaixo da média crustal, mas plenamente compatíveis com as encontradas em formações ferríferas bandadas pré-cambrianas segundo Fryer (1977). No entanto os valores são muito variáveis e tendem a ser mais elevados nas amostras mais ricas em manganês, em que é possível delinear ligeira correlação positiva entre si (Figura 41). Vários minerais oxihidróxidos de Mn são portadores de ETR, principalmente aqueles do grupo da hollandita-criptomelana, que estão presentes nas amostras investigadas. E isto está bem ilustrado nas amostras MN-04 e MN-22, em que estes minerais estão bem representados e os teores de ETR e em especial de Ce são mais elevados, 240 e 268 ppm, respectivamente.

Quando normalizados aos condritos os padrões das curvas mostram contínuo empobrecimento em relação aos elementos terras raras pesados, mas apresentam duas anomalias: anomalia positiva de Ce, por vezes até negativa de Ce, e anomalia positiva de Eu. Anomalia positiva de Ce em amostras ricas em oxihidróxidos de Mn é comum (Silva et al., 2012) enquanto de Eu é mais rara. Essas anomalias não apresenta nenhuma correlação com os teores de Mn, o que sugere que as mesmas devam refletir minerais específicos de Mn (amostras MN-12, 17, 18, 22, 30), em particular a hollandita, cuja estrutura aberta, permite a incorporação iônica destes elementos (Costa et al., 2006), sendo isto mais comum em ambiente supergênico. Localmente ocorre inclusive a formação de cerianita, CeO_2 .

Todas as amostras estudadas registraram anomalias positivas de Eu, comportamento comum nas Formações Ferríferas Bandadas arqueanas (Lindenmayer, 2001; Macambira, 2003; Costa, 2006; Pereira 2009), sendo categórico nas amostras de hematita friável “manganesífera” do minério friável de Carajás.

Os ETR com base na variação de suas concentrações permite delinear três grupos:

a) Grupo com teores relativamente altos de ETR, com total acima de 120 ppm, com destaque para a amostra MN-22 com 406.75 ppm e MN-04 com 446.92 ppm. Corresponde às amostras com alto teor de manganês.

b) Grupo com total intermediário, variando de 20.82 a 100.62 ppm.

c) Grupo com teores relativamente baixos de ETR, com soma < 20 ppm. As amostras de formações ferríferas de N8; N4-N5 e S11 têm comportamentos semelhantes a esse grupo. É possível que as amostras MN-05, MN-06, MN-08, MN-15 e MN-27 tenham sido remobilizadas das formações ferríferas primárias com Mn.

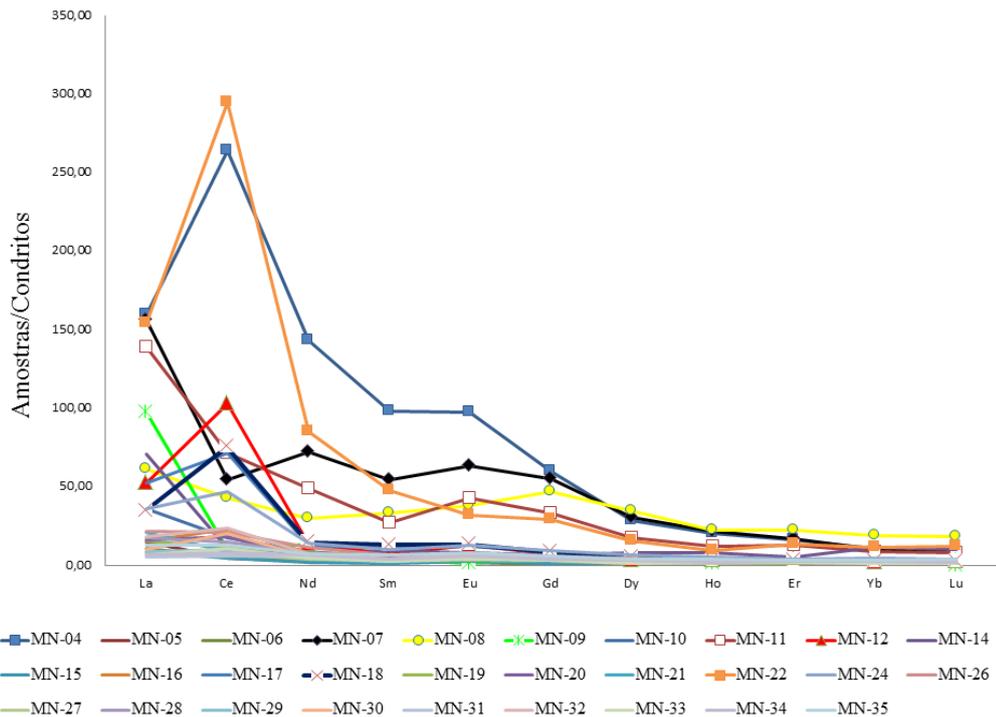


Figura 41 – Concentrações dos ETR das amostras de N5W, com anomalias de Ce normalizados aos condritos (Evesen et. al.,1978).

6.5 DISTRIBUIÇÃO AREAL DOS ELEMENTOS QUÍMICOS

Foram elaborados mapas de isotores para Fe_2O_3 , MnO , SiO_2 , P_2O_5 , Cu , Sr , Pb , Zn , Ba e Ce (Figuras 43 e 44). O mapa de localização das amostras em N5W, sobreposto o mapa de isotores de manganês mostra que os maiores teores de MnO estão concentrados na região centro-oeste da mina (Figura 42). Essa região está situada entre dois lineamentos de direção NW-SE e seccionada por um lineamento NE-SW observados anteriormente na Figura 11, que podem ter servido como condutos para a percolação de fluídos ricos em manganês.

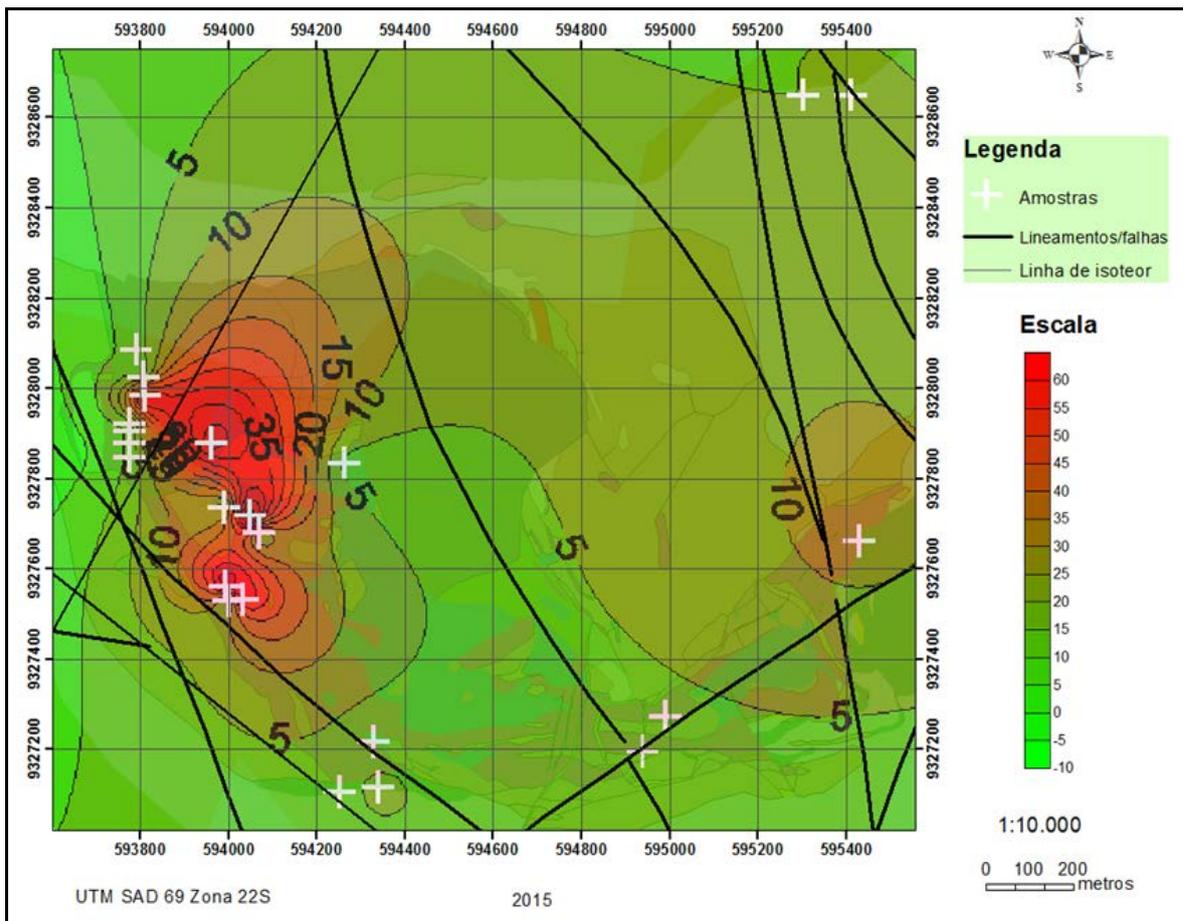


Figura 42 – Mapa de isoteor de MnO sobreposto à geologia da mina N5W.

Arealmente os teores de MnO ocupam domínio diferente dos de Fe_2O_3 . Por outro lado Cu , Zn , Sr , Ba , Pb e Ce (a associação já identificada) apresentam distribuição areal similar entre si, concentrando-se na região oeste da mina de N5W, coincidindo com o domínio das maiores concentrações de MnO , representadas no mapa geológico pelas hematitas “manganesíferas”, certamente com a representação da hollandita-criptomelana, e sob influência das zonas de fraturas, domínio dos lineamentos NE-SW e NW-SE.

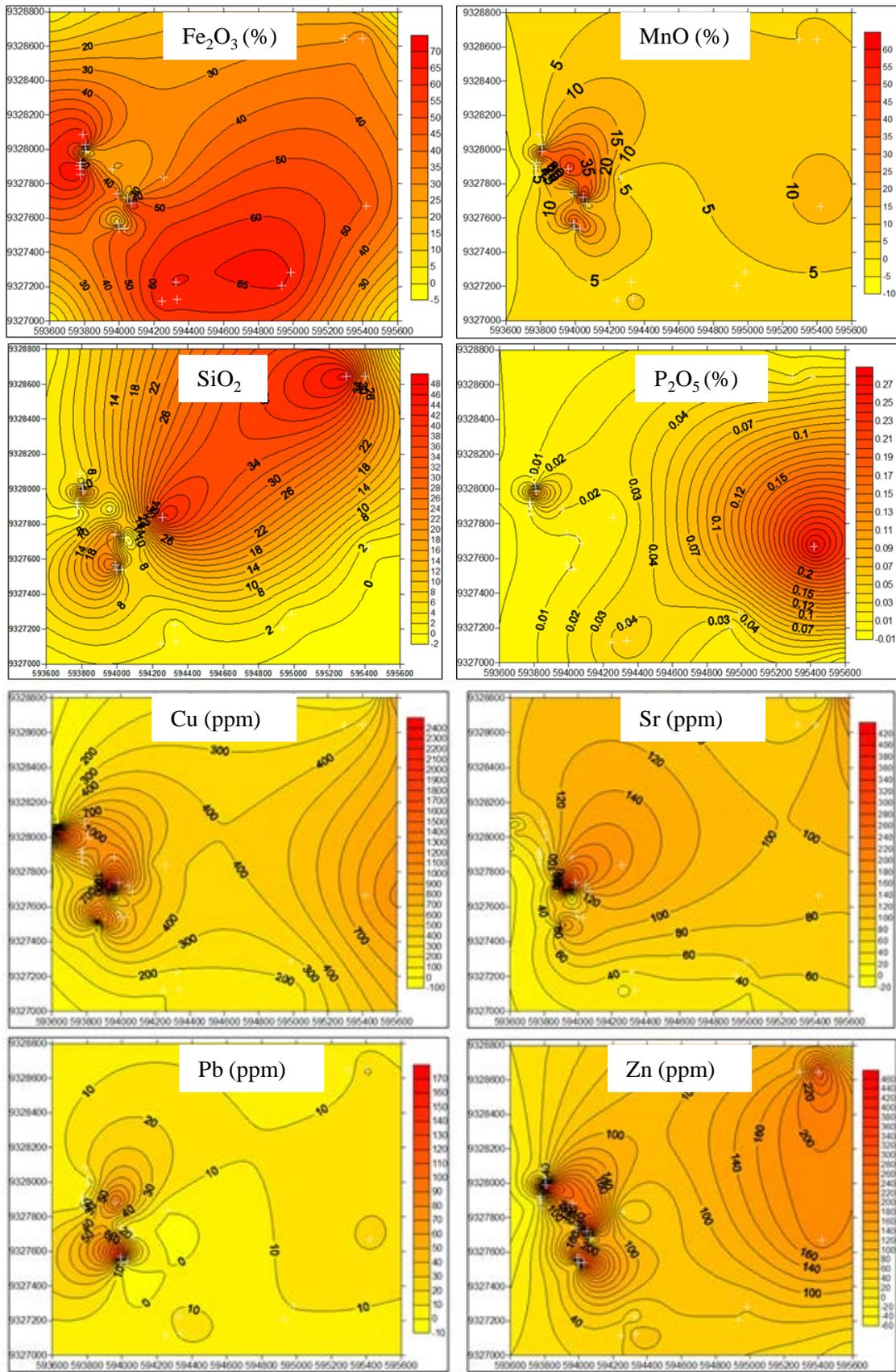


Figura 43 – Mapas de distribuição de isoteores de Fe_2O_3 , MnO , SiO_2 , P_2O_5 , Cu , Sr , Pb e Zn na área da mina N5W.

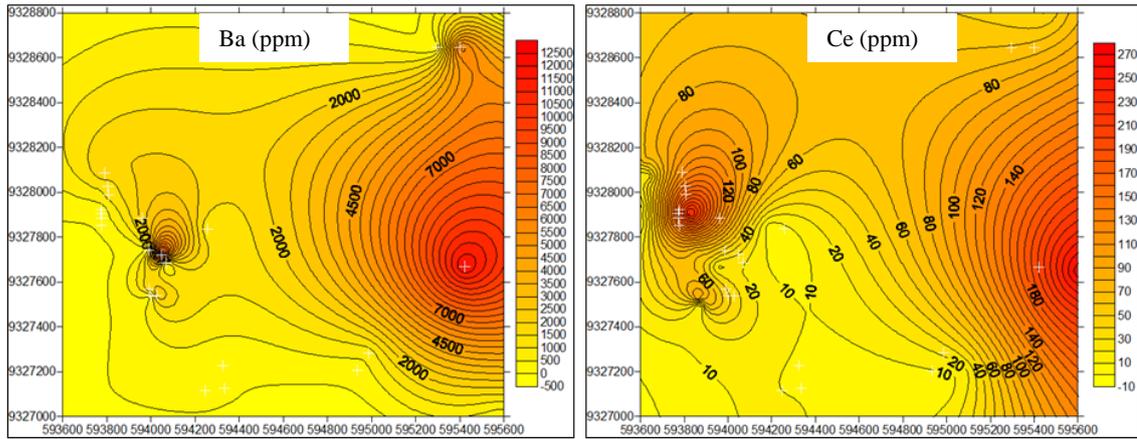


Figura 44 – Mapas de distribuição de isoteores de Ba e Ce na área da mina N5W.

7 CONCLUSÕES

O minério de ferro da mina de N5W é constituído predominantemente de hematitas friáveis (minério) e localmente hematitas compactas, que por vezes se associam com minerais de manganês (hematita “manganesífera”) em fraturas e falhas, com direções NW-SE, NE-SW e N-S. Os minerais de Mn são encontrados ainda no próprio protominério (jaspilitos) e na zona de contato com rochas máficas.

Mapeamento geológico e interpretações de dados aerogeofísicos, geoquímicos e mineralógicos mostram que as maiores concentrações de MnO estão alojadas em planos de falhas e fraturas na porção centro-oeste de N5W.

Os principais minerais de Mn são bixbyita, pirolusita e braunita, seguidos de criptomelana, hollandita, calcofanita e ramsdelita. Esses minerais sugerem que os mesmos se encontravam como fases primárias na própria formação ferrífera e foram remobilizados e depositados como novas fases ao longo de fraturas e falhas, em zonas de cisalhamentos, que atingiram a Formação Carajás e também pelas intrusões máficas. Neoformações intempéricas são mais restritas e mesmo se confundem com a mineralogia no seu todo. As formações ferríferas bandadas (jaspilitos) essencialmente constituída por hematita e quartzo microcristalino e jaspe, por vezes pode conter pequenas quantidades de oxi-hidróxidos de Mn.

Os boulders métricos de jaspilitos dentro do minério a hematitas friáveis (saprólito derivado dos jaspilitos) são comuns em N5W e respondem pela contaminação em SiO₂ na forma de quartzo microcristalino, advinda do proto-minério sobrevivendo como boulders no minério. As associações geoquímicas típicas são: Mn-As-Cu-Zn-Ag-ETR com valores anômalos positivos; e Zr-Hf-Nb-Ta-Sc-Th como valores negativos.

As anomalias positivas de Ce caracterizam os oxi-hidróxidos de Mn e as de Eu as hematitas/magnetitas das formações ferríferas bandadas.

O contaminante SiO₂ reflete a presença de relictos do protominério (jaspilito) e indica que a lavra atingiu a zona saprolítica enquanto o contaminante MnO é primário, ligado tanto às formações ferríferas quanto as suas deformações tectônicas com remobilização e recristalização de oxi-hidróxidos de Mn, que parecem concentrar-se nas zonas de falhas e contatos com as máficas e que durante o intemperismo são preservados e enriquecidos. O contaminante P₂O₅ parece mais efetivo no início da lavra, que começa com a extração do minério do topo do corpo lateritizado, que concentra e neoforma fosfatos, que em N5W parecem raros com base nas amostras analisadas.

REFERÊNCIAS

- Ab'Sáber A.N. 1986. Geomorfologia da Região de Carajás. In: Almeida Jr. J.M.G. (org.). Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento. São Paulo, Brasiliense, 88-124 p.
- 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/CPRM, 152 p.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N., Jorge João X.S., Costa, J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: 1º Congresso Latinoamericano de Geologia, Anais, p. 324-338.
- Avelar V.G., Lafon J.M., Correia Junior F.C., 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 Geociências. 29:453-460.
- 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: 7º Simpósio de Geologia da Amazônia, Resumos expandidos, Belém, SBG Núcleo Norte, p. 17-20.
- Beisiegel V.R. 1982. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, Anais, Belém, SBG Núcleo Norte, p 21-46.
- 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 Geociências, 3(4):215-242.
- Campos J.C.F. & Castilho A.F. 2012. Uma Visão Geográfica da Região da Flona de Carajás. In: Martins F.D., Castilho A.F., Campos J., Hatano F.M., Rolim S.G. Fauna da Floresta Nacional de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres. São Paulo, 236 p.
- Costa M.L. 1997. Lateritisation as a major process of ore deposit formation in the amazon region. Exploration Mining Geology, 6 (1): 79-104.
- Costa M.L., Choque Fernandez O.J., Requelme M.E.R. 2006. O depósito de manganês do Azul, Carajás: Estratigrafia, mineralogia, geoquímica e evolução geológica In: Marini O.J., Queiroz E.T., Ramos, B.W. (eds.). Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. Brasília, DNPM/CTMineral/FINEP/ADIMB, p 227-334.
- Costa M.L., Queiroz J.D.S., Silva A.C.S., Almeida D.D.F., Silva G.J.S., Costa L.C.G. 2011. Perfil Laterítico Desenvolvido Sobre Formação Ferrífera Bandada (Jaspilito) em Carajás. In: 12º Simpósio de Geologia da Amazônia, Anais. Boavista, SBG-Núcleo Norte.

- Costa U.A.P. 2006. Avaliação dos Processos Geradores do Minério de Ferro da Serra Norte de Carajás, Sudeste do Pará. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 104 p.
- Dall'Agnol R., Souza Z.S., Althoff F.J., Macambira M.J.B., Leite A.A.S. 1996. Geology and geochemistry of the Archean Rio Maria Granite-Greenstone Terrain, Carajás Province, Amazonian Craton. In: Symp. Archean Terranes South American Platform. Extended abstracts, Brasília, SBG, 29-30 p.
- Dardenne M.A. & Schobbenhaus C. 2001. Metalogênese do Brasil. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 392 p.
- Dias G.S., Macambira M.J.B., Dall'Agnol R., Soares A.D.V., Barros C.E.M. 1996. Datação de zircões de sill de metagabro: comprovação da idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás, Pará. In: 5º Simpósio de Geologia da Amazônia, Anais, Belém, SBG-Núcleo Norte, p. 376-379.
- DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais, Belém, SBG, p. 10-54.
- Domingos F.H.G. 2005. Geometria, Cinemática e História Tectônica das Rochas da Serra Norte, Carajás-Pa. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 119 p.
- Evensen N.M., Hamilton P.J., Onions R.K. 1978. Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42 (8): 1199-1212.
- Figueiredo e Silva R.C. 2004. Caracterização petrográfica e geoquímica de jaspilitos e minérios de ferro dos depósitos N1, N4W, N4E e N5E, Província Mineral Carajás, Pará: implicações para a mineralização de ferro. MS Dissertation, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, 155 p.
- _____. 2009. Evolução e gênese do minério de ferro hidrotermal nos depósitos de Serra Norte, Província Mineral de Carajás. PhD Thesis, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, 260 p.
- Figueiredo e Silva R.C.F., Lobato L.M., Rosière, C.A., Hagemann S., Zucchetti M., Baars F.J., Morais R., Andrade I. 2008. A Hydrothermal Origin for the Jaspilite-Hosted, Giant Serra Norte Iron Ore Deposits in the Carajás Mineral Province, Pará State, Brazil, p. 255-290. (*Society of Economic Geologists Reviews*, vol. 15).
- Fryer B.J. 1977. Rare Earth evidence in iron formation for changing Precambrian oxidation states. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41:361-367.

- Golder Associates Brasil. 2009. Relatório de Análise de Similaridade das Paisagens de Savana Metalófila: 2ª Aproximação e Recorte Espacial Preliminar da Área Mínima de Canga, Consoante com o Estudo para Avaliação do Tamanho Mínimo Viável de Áreas de Vegetação de Canga na Floresta Nacional de Carajás – ETAPA 2. Relatório, Parauapebas e Canaã dos Carajás.
- Golfari L. 1980. Zoneamento ecológico para reflorestamento na área de influência da Serra de Carajás. CVRD, Rio de Janeiro, Relatório 1(2): 3-18.
- Grainger C.J., Groves D.I., Tallarico F.H.B., Fletcher I.R. 2009. Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base and precious-metal mineralization. *Ore Geology Reviews*, 33: 451–489.
- Gutzmer J. & Beukes N.J. 1996. Mineral paragenesis of the Kalahari manganese field, South Africa. *Ore Geology Reviews*, 11: 405–425.
- Hein J.R., Koschinsky A., Halbach P., Manheim F.T., Bau M., Kang J.K., Lubick N. 1997. Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific. In: Nicholson K., Hein J.R., Buhn B., Dasgupta S. (eds.). *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*, p. 123–138. (Geol. Soc. Spec. Publ., 119).
- Huhn S.R.B., Souza C.I.J., Albuquerque M.C., Leal E. D., Brustolin V. 1999. Descoberta do depósito de Cu (Au) Cristalino: geologia e mineralização associada – Região da Serra do Rabo – Carajás – Pará. In: 6º Simpósio de Geologia da Amazônia, Boletim, Manaus, SBG-Núcleo Norte, p. 140-143.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 1989. *Geografia do Brasil: Região Norte*. Rio de Janeiro, v. 3.
- ICMbio. Disponível em: <http://www4.icmbio.gov.br/flonas/index.php?id_menu=133>. Acesso em: dez. 2014.
- Klein C. & Ladeira E.A. 2002. Petrology and geochemistry of the least-altered banded Iron-formation of the Archean Carajás Formation, northern Brazil: *Economic Geology*, 97: 643-651.
- Lindenmayer Z.G., Laux J.H., Teixeira J.B.G. 2001. Considerações sobre a origem das formações ferríferas da Formação Carajás, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 31:21-28.
- Lobato L.M., Figueiredo e Silva R.C., Rosière C.A., Zucchetti M., Baars F.J., Pimentel M., Rios F.J., Seoane J.C.S., Monteiro A.M. 2005b. Hydrothermal origin for the iron

- mineralization, Carajás Province, Pará state, Brazil. In: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Iron Ore 2005. Perth, Australia, p. 99-110. (Publication Series No 8/2005).
- 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. 2005a. 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. Brasília, DNPM/CTMineral/FINEP/ADIMB, p. 25-92.
- Macambira J.B. 2003. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 217 p.
- Macambira J.B. 1992. Os possíveis microfósseis da Formação Carajás – Pará. In: 37º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais, São Paulo, v. 2, p. 484-284.
- Macambira J.B., Ramos J.F.F., Assis J.F.P., Figueiras A.J.M. 1990. Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca: Relatório Final. Belém, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 150 p.
- Medeiros Filho C.A., Santos A.B., Brauer E.H., Cordeiro J.R.C., Fernandes E. 1994. Significado da Distribuição de Mn e Al nos Minérios de Ferro na Parte Norte do Depósito de N4W – Carajás. In: 4º Simpósio de Geologia da Amazônia, Anais, Belém, SBG, Núcleo Norte, p. 359-362.
- Meirelles M.R. 1986. Geoquímica e Petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás-PA. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 150 p.
- Mukhopadhyay A. & Chada S. K. 1972. Silica diagenesis in the banded hematite jasper and banded chert associated with the Iron Ore group of Jamda-Koira Valley, Orissa, India. *Sedimentary Geology*, 8: 113 – 135.
- Nicholson K. 1992. Contrasting mineralogical–geochemical signatures of manganese oxides: Guides to metallogenesis. *Economic Geology*, 87, 1253–1264.
- Nogueira A.C. 1995. Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, Região Central da Serra dos Carajás-Pará. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 167 p.

- Pereira R.M.P. 2009. Geologia da Região Sul da Serra Norte e Características do Minério de Ferro do Depósito N8, Província Mineral de Carajás. MS Dissertation, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, 131 p.
- Pinheiro R.V.L. 1997. Reactivation History Of The Carajás And Cinzento Strike-Slip Systems, Amazon, Brazil. PhD Thesis, University Of Durham, 408 p.
- Resende N.P. & Barbosa, A.L.M. 1972. Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará. Belém, AMZA, 248 p. (Relatório, 1).
- Rosière C. A., Baars F.J., Seoane J.C.S., Lobato L.M., Lopes L., Souza S.R.C. 2005. Structure and iron mineralisation in the Carajás Province. In: Proceedings Iron Ore 2005, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 143-150. (Publication Series, 8).
- Rosière C.A., Seoane J.C.S., Baars F.J., Lobato, L.M. 2004. Estruturação da província de Carajás e sua influência na mineralização de ferro, PA. In: Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Ouro Preto, ADIMB. CD-ROM.
- Silva D.C.C. 2006. Estudo da Geometria e Cinemática das Rochas Sedimentares Arqueanas da Mina do Igarapé do Azul. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 125 p.
- Silva G.G., Lima M.I.C., Andrade A.R.F., Issler R.S., Guimarães G. 1974. In: BRASIL. Projeto RADAMBRASIL. Folha SC.22 Tocantins: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da Terra, v. 1, p.1-143. (Levantamento de Recursos Naturais, Rio de Janeiro, 4).
- Suszczynski E. 1972. A Origem Vulcânica do Minério de Ferro Primário da Serra dos Carajás – Estado do Pará – Região Amazônica. In: 26º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais, Belém, p. 103-120.
- Tassinari C.C.G. & Macambira M. J. B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22(3): 174-182.
- Teixeira J.B.G. 1994. Geochemistry, Petrology, and Tectonic Setting of Archean Basaltic and Dioritic Rocks from the N4 Iron Deposit, Serra dos Carajás, Pará, Brazil. PhD Thesis, Department of Geosciences, Penn State University, 161 p.
- Teixeira J.B.G., Ohmoto H., Eggler D.H. 1997. Elemental and oxygen isotope variations in Archean mafic rocks associated with the banded iron-formation at the N4 iron deposit, Carajás, Brazil. In: Costa M.L. & Angélica R.S. Contribuições à Geologia da Amazônia. FINEP/SBG, 161-203 p.

Tolbert G.E., Tremaine J.W., Melcher G.C., Gomes C.B. 1971. The recently discovered serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil. *Economic Geology*, 66(7): 985-994.

Wedepohl K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**: 1217-1232.