



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



## **TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS  
BANDADAS DO SUPERGRUPO ITACAIÚNAS, PROVÍNCIA CARAJÁS,  
CRÁTON AMAZÔNICO**

**Gabriel Evangelista Petarli**

**MONOGRAFIA Nº 498**

Ouro Preto, janeiro de 2024



**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DO SUPERGRUPO  
ITACAIÚNAS, PROVÍNCIA CARAJÁS, CRÁTON  
AMAZÔNICO**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr. Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Dr. Geraldo Magela Santos Sampaio



# **MONOGRAFIA**

**Nº 498**

## **CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS, SUPERGRUPO ITACAIÚNAS, CRATON AMAZÔNICO**

**Gabriel Evangelista Petarli**

*Orientador*

**Prof. Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2023/2.

**OURO PRETO**

**2024**

---

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P477c Petarli, Gabriel Evangelista.

Caracterização petrográfica das formações ferríferas bandadas do supergrupo Itacaiúnas, Província Carajás, Cráton Amazônico..

[manuscrito] / Gabriel Evangelista Petarli. - 2024.

75 f.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Petrologia. 2. Geologia. 3. Minério de ferro. 4. Crátons. I. Melo, Gustavo Henrique Coelho de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 552

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787





## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gabriel Evangelista Petarli**

### **Caracterização petrográficas das formações ferríferas bandadas do Supergrupo Itacaiúnas, Província Carajás, Cráton Amazônico**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro geólogo

Aprovada em 29 de janeiro de 2024

#### Membros da banca

Prof. Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Emilio Evo Magro Correa Urbano - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
MSc Kamila Gomes Fernandes - (Universidade Estadual de Campinas)

Gustavo Henrique Coelho de Melo , orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/03/2024



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Henrique Coelho de Melo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/03/2024, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) , informando o código verificador **0676294** e o código CRC **55712C83**.



## Agradecimentos

---

Sempre fui sonhador, é isso que me mantém vivo. Agradeço a Deus, minha fonte de força e resiliência, aos meus familiares e amigos por acreditar nesse propósito. Todas as conquistas começam com o simples ato de acreditar que elas são possíveis. Muita gratidão pelas vitórias e pela minha saúde, ao meu pai Ademir pelo exemplo de humildade e caráter. A minha mãe Rosemary pela sabedoria e força de vontade para superar os obstáculos. Ao meu irmão Henrique e a minha irmã Thayná por me incentivarem e apoiarem minhas decisões. Às famílias Evangelista e Petarli por serem meu porto seguro e fonte de inspiração. A Larissa, pelo nosso amor e planos. Aos meus amigos de infância do Filomena pelos inesquecíveis momentos. A E.M.E.F. Lourdes Scardini, E.E.E.M. Dom Daniel Comboni e ao Instituto Federal do Espírito Santo (Campus Nova Venécia) pelo ensino público, gratuito e de qualidade. Agradeço às pessoas especiais que despertaram meu encanto pela Geologia e a toda galera da turma N14, em especial Bruno, Prof. Juliano e Prof. Wagner (in memoriam). Ao DEGEO/EM/UFOP e todos os professores pelos ensinamentos, em especial Prof. Gustavo Melo pelos ensinamentos, empatia, paciência e incentivo profissional/acadêmico. À Fundação Gorceix pelo apoio financeiro e educacional, ao MICROLAB/LMIC pela oportunidade, a LAGEM e SEG SC pelas experiências enriquecedoras. Obrigado CSN Mineração e GEOSOL pelos aprendizados e crescimento profissional. Ao 15.2, melhor período! Em especial meu grande amigo Airton. A Vila dos Tigres, Festa da Vila e Bloco da Vila pelas amizades e parcerias. Às repúblicas Serena, Utopia, Volúpia, Jardim, Vira Saia, Sinagoga, Reino de Baco e Koxixo por tornar os momentos mais simples nas melhores curriolas. Muito Obrigado meu eterno lar Mansão REPÚBLICA CONSULADO! A todos os ex-alunos e moradores, em especial a Maria e a Miúda pelo carinho e cuidado. Por fim, muito obrigado OURO PRETO e a todos os envolvidos nessa trajetória inesquecível. Gratidão pelos melhores anos da minha vida! Viva a Escola de Minas!



## Resumo

---

A Província Carajás, no estado do Pará, é reconhecida por hospedar grandes depósitos de ferro em formações ferríferas bandadas e de cobre do tipo óxido de Fe-Cu-Au (IOCG) de classe mundial. No entanto, muitos aspectos ainda permanecem em aberto em relação aos processos evolutivos e genéticos dessas mineralizações e a própria relação entre elas. Um importante aspecto dos depósitos IOCG é que alguns deles (e.g. Salobo, Grotta Funda, GT-46, QT-02 e Igarapé Bahia) são hospedados por formações ferríferas bandadas (BIF) do Supergrupo Itacaiúnas. Muitas dessas BIF evoluem para zonas de alteração hidrotermal com granada, grunerita, biotita e magnetita, que hospedam o minério de cobre. Recentemente, alguns estudos apontam a importância das formações ferríferas bandadas e outros produtos exalativos para as mineralizações IOCG. Por outro lado, as BIF da Formação Carajás hospedam os principais depósitos de ferro de Carajás. No entanto, ainda pouco se conhece a respeito das principais diferenças dessas BIF em termos descritivos e genéticos. Neste trabalho, a caracterização macro e microscópica das BIF sugere que a assembleia mineral e estruturas primárias das BIF são similares nas unidades litoestratigráficas, mesmo que eventos hidrotermais posteriores modifiquem de forma heterogênea tais características. O metassomatismo ocorre de forma mais intensa em regiões proximais a zonas de cisalhamento regionais, sendo que evidências de deformação (dobras e falhas) são constantemente reconhecidas nessas rochas. No entanto, o ambiente de precipitação destas importantes formações ferríferas permanecem em aberto devido à complexidade litoestratigráfica. Porém, a assinatura geoquímica indica um contexto híbrido para a formação das BIF da Província Carajás. Logo, a caracterização petrográfica e textural de detalhe das distintas formações ferríferas bandadas do Supergrupo Itacaiúnas permitiram entender a semelhança das paragêneses minerais, intensidade do metassomatismo e características estruturais predominantes nas BIF, assim como a influência de eventos hidrotermais como a carbonatação que é mais comum em sequências ferríferas de alto teor.

**Palavras-chave:** BIF, Supergrupo Itacaiúnas, Cráton Amazônico.



## Abstract

---

The Carajás Province, in the state of Pará, is renowned for hosting large deposits of iron in banded iron formations and world-class copper-iron-gold oxide (IOCG) deposits. However, many aspects related to the evolutionary and genetic processes of these mineralizations, as well as their interrelation, remain open. An important aspect of IOCG deposits is that some of them (e.g., Salobo, Grota Funda, GT-46, QT-02, and Igarapé Bahia) are hosted by banded iron formations (BIF) of the Itacaiúnas Supergroup. Many of these BIF evolve into hydrothermal alteration zones with garnet, grunerite, biotite, and magnetite, which host the copper ore. Recently, some studies emphasized the significance of banded iron formations and other exhalative products for IOCG mineralizations. On the other hand, the BIF of the Carajás Formation hosts the main iron deposits in Carajás. However, little is known about the main differences in descriptive and genetic terms of these BIF. In this work, macro and microscopic characterization of the BIF suggests that the mineral assembly and primary structures of the BIF are similar in lithostratigraphic units, even though later hydrothermal events heterogeneously modify such characteristics. Metasomatism occurs more intensely in regions proximal to regional shear zones, with evidence of deformation (folds and faults) consistently recognized in these rocks. However, the precipitation environment of these important banded iron formations remains open due to lithostratigraphic complexity. Nevertheless, geochemical signatures indicate a hybrid context for the formation of the Carajás Province BIF. Therefore, detailed petrographic and textural characterization of the distinct banded iron formations of the Itacaiúnas Supergroup has allowed understanding the similarity of mineral parageneses, metasomatism intensity, and predominant structural characteristics in BIF, as well as the influence of hydrothermal events such as carbonation, which is more common in high-grade iron sequences.

**Keywords:** BIF, Itacaiúnas Supergroup, Amazon Craton.





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.1:</b> Mapa simplificado de localização da área e dos depósitos utilizando base cartográfica <i>basemap</i> e arquivos vetores <i>shapefile</i> de base pública no ArcGIS..	2
<b>Figura 2.1:</b> Mapa das províncias e domínios tectônicos do Cráton Amazônico no Estado do Pará	7
<b>Figura 2.2:</b> Domínio Carajás com as principais formações geológicas e distribuições de depósitos. Em vermelho os principais depósitos onde foram coletadas as amostras de BIF.	9
<b>Figura 2.3:</b> Distribuição dos principais depósitos e prospectos de ferro da Província Mineral de Carajás.	11
<b>Figura 3.1:</b> Distribuição dos principais depósitos e prospectos de ferro no mundo.	15
<b>Figura 3.2:</b> Modelo sobre a oxidação de ferro a partir de uma fonte oceânica para explicar ambiente deposicional para formações ferríferas bandadas.	16
<b>Figura 4.1:</b> Mapa geológico simplificado da porção norte do Domínio Carajás destacando a localização das amostras de BIF analisadas neste trabalho (estrela roxa).	19
<b>Figura 4.2:</b> Coluna estratigráfica com a sequência metavulcanossedimentar do Grupo Igarapé Bahia e da Formação Águas Claras e níveis mineralizados (Melo <i>et al.</i> 2019).	20
<b>Figura 4.3:</b> Mapa geológico exibindo os quatro corpos lenticulares e mineralizados do depósito Igarapé Bahia.	21
<b>Figura 4.4:</b> Aspectos macroscópicos das formações ferríferas bandadas do Grupo Igarapé Bahia.	22
<b>Figura 4.5:</b> Seção geológica simplificada do Depósito GT 46 exibindo a relação entre as rochas hospedeiras, alterações hidrotermais e níveis mineralizados	23
<b>Figura 4.6:</b> Formações ferríferas bandadas típicas dos depósitos da Formação Salobo-Pojuca.	24
<b>Figura 4.7:</b> Perfil dos depósitos AN-34 (A) e QT-02 (B) mostrando as rochas hospedeiras, corpos mineralizados lenticulares e alterações hidrotermais associadas a mineralização	25
<b>Figura 4.8:</b> Mapa geológico simplificado e perfil do depósito Grota Funda apresentando as principais rochas hospedeiras e distribuição espacial das zonas mineralizadas	26
<b>Figura 4.9:</b> (A) Estratigrafia da parte basal da Bacia de Carajás destacando a Formação Carajás.	27
<b>Figura 4.10:</b> Lâminas petrográficas estudadas do Grupo Igarapé Bahia em (A) e das Formações Salobo-Pojuca (B-E) e Carajás (F-H).	29
<b>Figura 4.11:</b> Fotomicrografias da BIF do Grupo Igarapé Bahia, depósito Igarapé Bahia (DH011-388).	31

**Figura 4.12:** Fotomicrografias da BIF do Grupo Salobo-Pojuca..... 32

**Figura 4.13:** Fotomicrografias da BIF da Formação Carajás. .... 33

# INDÍCE DE TABELAS

---

<b>Tabela 0.1:</b> Características descritivas e comparações entre as BIF.....	30
--	----



# SUMÁRIO

---

Agradecimentos .....	ix
Resumo .....	xi
Abstract.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xv
INDÍCE DE TABELAS .....	xvii
SUMÁRIO.....	xix
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA .....	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
1.5.1 Revisão bibliográfica.....	4
1.5.2 Seleção de Amostras.....	4
1.5.3 Estudos Petrográficos .....	4
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL .....	5
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA CARAJÁS .....	5
2.2 METALOGÊNESE DA PROVÍNCIA CARAJÁS .....	7
2.3 OCORRÊNCIA DE BIF NA PROVÍNCIA CARAJÁS .....	10
3 FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS .....	15
3.1 TIPOS E GÊNESE DE FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS .....	15
3.2 MINERALOGIA, TEXTURAS E MICROESTRUTURAS EM BIF .....	16
3.3 METAMORFISMO, DEFORMAÇÃO E ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL EM BIF.....	17
4 RESULTADOS.....	19
4.1 CARACTERÍSTICA MACROSCÓPICA DAS BIF.....	19
4.1.1 Formações ferríferas bandadas no Grupo Igarapé Bahia .....	19
4.1.2 Formações ferríferas bandadas da Formação Salobo-Pojuca.....	22
4.1.3 Formações ferríferas bandadas da Formação Carajás.....	26
4.2 PETROGRAFIA MICROSCÓPICA DAS BIF.....	28
4.2.1 Grupo Igarapé Bahia .....	29
4.2.2 Formação Salobo-Pojuca.....	31
4.2.3 Formação Carajás .....	33
5 DISCUSSÕES.....	35

5.1 CARACTERÍSTICAS DESCRITIVAS E COMPARAÇÕES ENTRE AS BIF DE DIFERENTES UNIDADES .....	35
5.2 AMBIENTES DE PRECIPITAÇÃO DAS BIF.....	36
5.3 EVIDÊNCIAS DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL E METAMORFISMO NAS BIF.....	36
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>41</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>47</b>

### 1.1 APRESENTAÇÃO

Há uma crescente demanda de cobre em escala mundial com a expansiva aplicação deste recurso mineral como matéria-prima em infraestrutura de energia e tecnologias verdes (Ibanez 2022). O Brasil se destaca por ser um território com alto potencial para depósitos minerais de cobre, o que fortalece o desenvolvimento de pesquisas para entender os processos genéticos de enriquecimento do teor desse minério e suas associações, ou até mesmo a busca por compreensões inéditas e prospecções de novos depósitos desta classe.

O Domínio Carajás, localizado na Província Carajás, Cráton Amazônico, destaca-se como a região de maior produção de cobre no Brasil (Juliani *et al.* 2016). Os depósitos do tipo *Iron-Oxide Copper Gold* (ou IOCG) compreendem os principais depósitos e minas de cobre da região. Esses depósitos dividem-se entre os localizados no Cinturão Sul do Cobre (e.g. Sossego, Cristalino e Alvo 118) e aqueles do Cinturão Norte do Cobre (Salobo, Igarapé Bahia, GT-46 e QT-02; Xavier *et al.* 2012). Enquanto os depósitos do sul exibem extensos halos de alteração Na e Na-Ca (Monteiro *et al.* 2008; Moreto *et al.* 2015), os depósitos localizados ao norte exibem halos de alteração Fe-K com conteúdo elevado de granada, grunerita e magnetita (Melo *et al.* 2017, Toledo *et al.* 2019). No entanto, muitos aspectos ainda permanecem em aberto em relação aos processos evolutivos e genéticos dessas mineralizações e a própria relação entre elas.

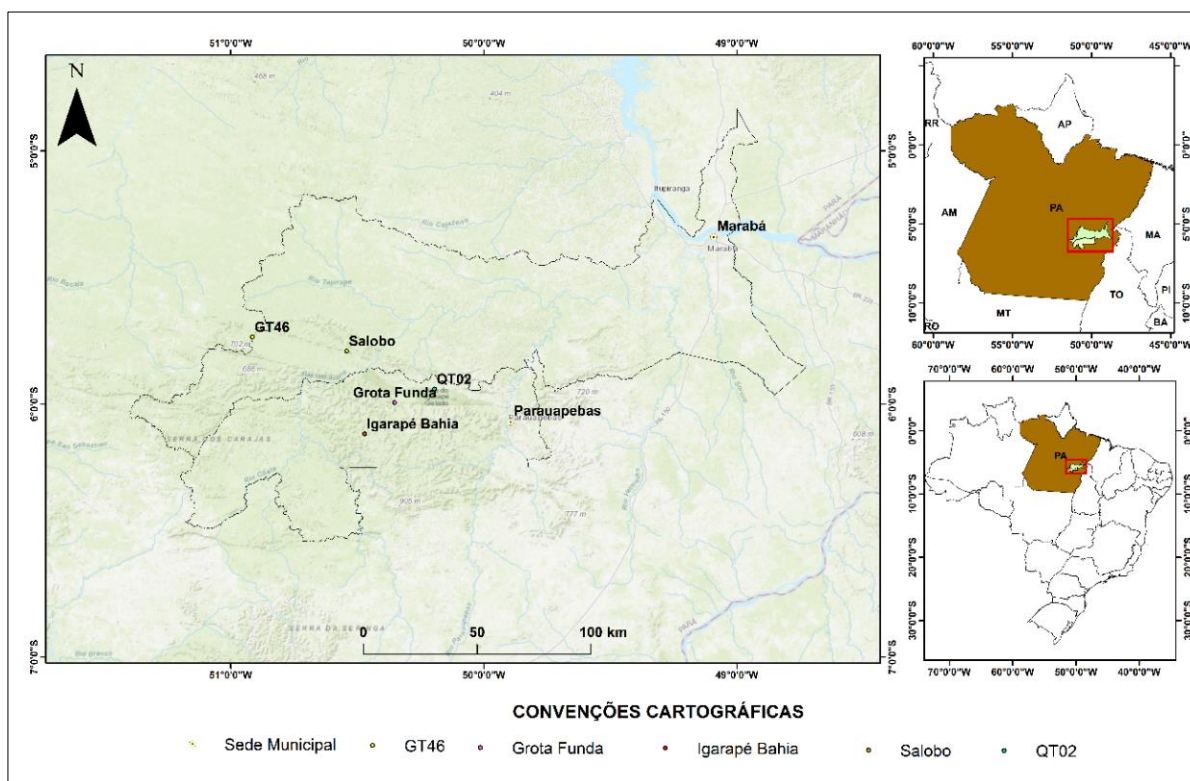
Esses depósitos são comumente considerados como não tendo nenhum controle litológico (Xavier *et al.* 2012, Monteiro *et al.* 2014). Recentemente, novos estudos mostraram que a presença de relictos de formações ferríferas bandadas em escala de depósitos podem controlar as paragêneses hidrotermais observadas nestes depósitos. Assim, paragêneses com granada (almandina), grunerita e stilpnomelano podem ser resultado direto da interação de fluidos hidrotermais de alta temperatura com formações ferríferas bandadas (BIF) ou mesmo registrar processos de metamorfismo (Melo *et al.* 2016; Toledo *et al.* 2019). Nestes depósitos, a compreensão das tipologias, paragêneses e processos genéticos das diferentes formações ferríferas bandadas de Carajás pode elucidar questões referentes aos controles litológicos dos depósitos IOCG, particularmente aqueles do Cinturão Norte do Cobre. Adicionalmente, as distintas BIF estudadas neste trabalho podem representar diferentes ambientes e tempos de formação, além de conter informações importantes sobre a químicas do oceano no Arqueano.

Neste sentido, os depósitos IOCG dessa região, como por exemplo Grota Funda, GT-46, QT-02 e Igarapé-Bahia são hospedados por formações ferríferas bandadas (BIF) do Supergrupo Itacaiúnas com

presença de zonas de alteração hidrotermal e mineralização de Cu-Au. No entanto, essas BIF pertencem a diferentes grupos e formações e registram aspectos descritivos distintos. Assim, este trabalho de conclusão de curso visa a caracterização textural e das principais composições mineralógicas de distintas formações ferríferas bandadas. Essas análises poderão fornecer informações sobre o ambiente de formação das BIF, aspectos sobre sua mineralogia predominante e um maior entendimento sobre o processo de evolução hidrotermal e/ou metamórfico do setor norte do Domínio Carajás.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO

A área escolhida para desenvolvimento deste trabalho está na Província Carajás localizado na região sudeste do estado do Pará, região norte do Brasil, na porção sudeste do Cráton Amazonas. Envolve os municípios de Canaã dos Carajás, Marabá, Parauapebas (Figura 1.1). O acesso se dá de forma aérea, com voo direto partindo das principais capitais até Belém, a capital do estado do Pará ou pelas rodovias através das BR 155, BR 150 e BR 222, além da rodovia estadual PA-160 até o município de Canaã dos Carajás e a PA-275 até o município de Parauapebas. A área fica a aproximadamente 300 km do município Marabá, 200 Km do município de Canaã dos Carajás e cerca de 150 km do município de Parauapebas.



**Figura 1.1:** Mapa simplificado de localização da área e dos depósitos utilizando base cartográfica *basemap* e arquivos vetores *shapefile* de base pública no ArcGIS. (Fonte: IBGE 2014).



### 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo geral a caracterização petrográfica de formações ferríferas bandadas do Supergrupo Itacaiúnas, pertencente à Província Carajás. Os objetivos específicos incluem:

- a) Caracterização mineralógica e textural de diferentes formações ferríferas bandadas;
- b) Identificação de possíveis evidências de alteração hidrotermal e mineralização em BIF;
- c) Caracterização microestrutural de amostras de formações ferríferas bandadas;
- d) Reconhecimento e comparação de possíveis evidências de alteração hidrotermal versus paragêneses metamórficas;
- e) Compreensão da relação das BIF com zonas mineralizadas de cobre.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

As formações ferríferas bandadas (BIF) hospedeiras dos depósitos GT-46, Grota Funda, QT-02 e Igarapé Bahia ainda carecem de maiores investigações para entender os possíveis controles litológicos que elas exercem nas mineralizações IOCG. As formações Salobo-Pojuca e Igarapé-Bahia compreendem importantes rochas hospedeiras nos depósitos IOCG da porção norte da província Carajás, especialmente nos depósitos GT-46, QT-02 e Igarapé Bahia (e.g. Melo *et al.* 2016, Hunger *et al.* 2019).

As paragêneses minerais com granada, grunerita e magnetita são comuns nesses depósitos e parecem se desenvolver a partir da alteração das BIF. Em contrapartida, as BIF da Formação Carajás, que compreendem os principais depósitos de ferro da província e do Brasil, parecem se diferenciar de forma mineralógica e, possivelmente genéticas daquelas hospedeiras dos IOCG (Figueiredo e Silva *et al.* 2013). De forma geral, todas essas BIF estão associados a ambientes de assoalho oceânico mais antigo e podem ter sido formadas em conjunto com a exalação de cobre (Figueiredo e Silva *et al.* 2020, Melo *et al.* 2021).

No entanto, ainda assim são escassos os dados de petrografia detalhada, no que se refere à mineralogia predominante, microestruturas de deformação e feições de alteração hidrotermal nessas BIF. Neste cenário, as formações ferríferas do Supergrupo Itacaiúnas na Província Carajás representam um importante objeto de estudo para entender os processos metalogenéticos, pois compreendem tanto hospedeiras de mineralizações IOCG fortemente alteradas por alteração hidrotermal de alta temperatura quanto representam os grandes depósitos de ferro da região.

## **1.5 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este trabalho de conclusão de curso foi realizado conforme os itens descritos a seguir.

### **1.5.1 Revisão bibliográfica**

A etapa de revisão bibliográfica foi desenvolvida durante todo o andamento do projeto. Foram realizados estudos da literatura regional, a fim de ter um melhor entendimento da geologia do Domínio Carajás (Província Carajás) e das formações ferríferas bandadas diversas que ocorrem na região. Adicionalmente, os processos de caracterização mineralógica, petrográfica, padrões de deformação e halos de alteração hidrotermal de amostras de depósitos de óxido Fe-Cu-Au (IOCG) também foram enfatizados.

### **1.5.2 Seleção de Amostras**

As amostras já foram coletadas pelo orientador do projeto durante etapas prévias de trabalho de campo. As amostras incluem principalmente partes de testemunhos de sondagem de formações ferríferas bandadas dos depósitos (i) IOCG GT-46, Igarapé Bahia, QT-02, (ii) dos depósitos de ferro de N4 e (iii) de afloramentos regionais de BIF. A partir dessas amostras foram confeccionadas 11 seções delgadas-polidas.

### **1.5.3 Estudos Petrográficos**

As amostras foram encaminhadas para o LAMIN (DEGEO-UFOP), para confecção de lâminas delgadas-polidas e foram analisadas via microscopia de luz refletida e transmitida no Laboratório de Microscopia do DEGEO – UFOP. Nesta etapa buscou-se descrever aspectos como paragênese hidrotermal, microestruturas e relações de contato.

## CAPÍTULO 2

### CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

---

#### 2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA CARAJÁS

Localizado no norte da Província Carajás (borda sudeste do Cráton Amazônico) e ao longo da extensa zona de cisalhamento Cinzento (WNW-ESE), o Domínio Carajás compõe uma região de extrema importância geológica com importantes depósitos minerais do tipo IOCG (*iron oxide–copper–gold* deposits) de alto valor econômico. É limitado por domínios tectônicos de gêneses e idades distintas, onde ao norte ocorre Domínio Bacajá de idade paleoproterozóica, ao leste com o Cinturão Araguaia de idade neoproterozóica, ao oeste com o Domínio Irixi-Xingu de idade paleoproterozóica e ao sul, o Domínio Rio Maria de idade Mesoarqueana.

De acordo com Araújo *et al.* (1988) e Machado *et al.* (1991), o Domínio Carajás é constituído por um embasamento Mesoarqueano composto por gnaisses e migmatitos tonalíticos a trondjemíticos (e.g. Complexo Xingu  $3066 \pm 6,6$  Ma, Delinardo da Silva 2014), ortogranulitos máficos a félsicos (e.g. ortogranulitos Chicrim- Cateté inseridos no Complexo Pium,  $3002 \pm 14$  Ma, Pidgeon *et al.* 2000) e lascas de sequências do tipo *greenstone belt* (Grupo Sequeirinho; Tavares 2015), datadas em 2,97 Ga no Corpo Pista (Depósito Sossego, Moreto *et al.* 2015). Estudos recentes propõem a individualização de granitóides, previamente atribuídos ao Complexo Xingu, como: (i) Tonalito Bacaba e Granito Sequeirinho (ca. 3,0 Ga; Moreto *et al.* 2011); (ii) Granito Canaã dos Carajás (2,96-2,93 Ga, Feio *et al.* 2012); (iii) Trondjemito Rio Verde, Tonalito Campina Verde e Granitos Cruzadão e Serra Dourada (2,87-2,83 Ga; Feio *et al.* 2012; Moreto *et al.* 2011).

O embasamento é sobreposto por sequências metavulcanossedimentares: (i) Grupo Aquiri (Macambira & Vale 1997), constituído por rochas metavulcânicas máficas a ácidas e rochas metassedimentares (quartzitos, filitos e formações ferríferas); (ii) Supergrupo Itacaiúnas (ca. 2,76-2,73 Ga, DOCEGEO 1988); e (iii) Grupo Rio Novo (Hirata *et al.* 1982), caracterizado por anfibolitos, xistos, metagrauvas, rochas metavulcânicas toleíticas e gabros.

O Supergrupo Itacaiúnas é subdividido em quatro grupos. O mais antigo, Igarapé Salobo ( $2761 \pm 3$  Ma, idade do metamorfismo, Machado *et al.* 1991) é constituído por paragnaisses, anfibolitos, metagrauvas e formações ferríferas (DOCEGEO 1988). É sobreposto pelo Grupo Grão Pará, que engloba rochas metavulcânicas intermediárias a félsicas, brechas, quartzitos e conglomerados da Formação Parauapebas ( $2759 \pm 2$  Ma, Machado *et al.* 1991,  $2760 \pm 11$  Ma Trendall *et al.* 1998) e uma espessa sequência de rochas metassedimentares químicas, dolomitos e formações ferríferas jaspilíticas (Meirelles 1986; Lindenmayer *et al.* Macambira & Schrank 2002) da Formação Carajás (idade de

deposição entre 2750 Ma e 2740 Ma, Trendall *et al.* 1998). O Grupo Igarapé Bahia ( $2748 \pm 31$  Ma, Tallarico *et al.* 2005) é formado por rochas metavulcânicas, metapiroclásticas, metassedimentares e formações ferríferas (DOCEGEO 1988). A unidade mais jovem, Grupo Igarapé Pojuca ( $2732 \pm 3$  Ma, idade do metamorfismo, Machado *et al.* 1991) é composta por rochas metavulcânicas básicas, xistos, anfibolitos e formações ferríferas, metamorfizados em fácies xisto verde a anfibolito (DOCEGEO 1988). A sucessão vulcanossedimentar do topo da Bacia de Carajás encerra com as formações Serra Sul (diamictitos subglaciais e marinhos intercalados com estratos de argilito e folhelho negro), Azul (ritmito com lamito subordinadamente intercalado.), Águas Claras e Gorotire (conglomerados e arenitos depositados em um sistema aluvial ao fluvial) (Araújo Filho *et al.* 2020).

As rochas do embasamento e as sequências supracrustais são cortadas por: i) intrusões máfico-ultramáficas acamadadas de 2,76 Ga (Complexo Luanga e Suíte Intrusiva Cateté; Machado *et al.* 1991); ii) granitos do Tipo A sintectônicos de ca. 2,74 Ga (Suítes Plaquê, Planalto, Estrela, Igarapé Gelado, Serra do Rabo; Avelar *et al.* 1999; Barros *et al.* 2004); e iii) granitos do Tipo A de 1,88 Ga (Suíte Intrusiva Serra dos Carajás; Machado *et al.* (1991).

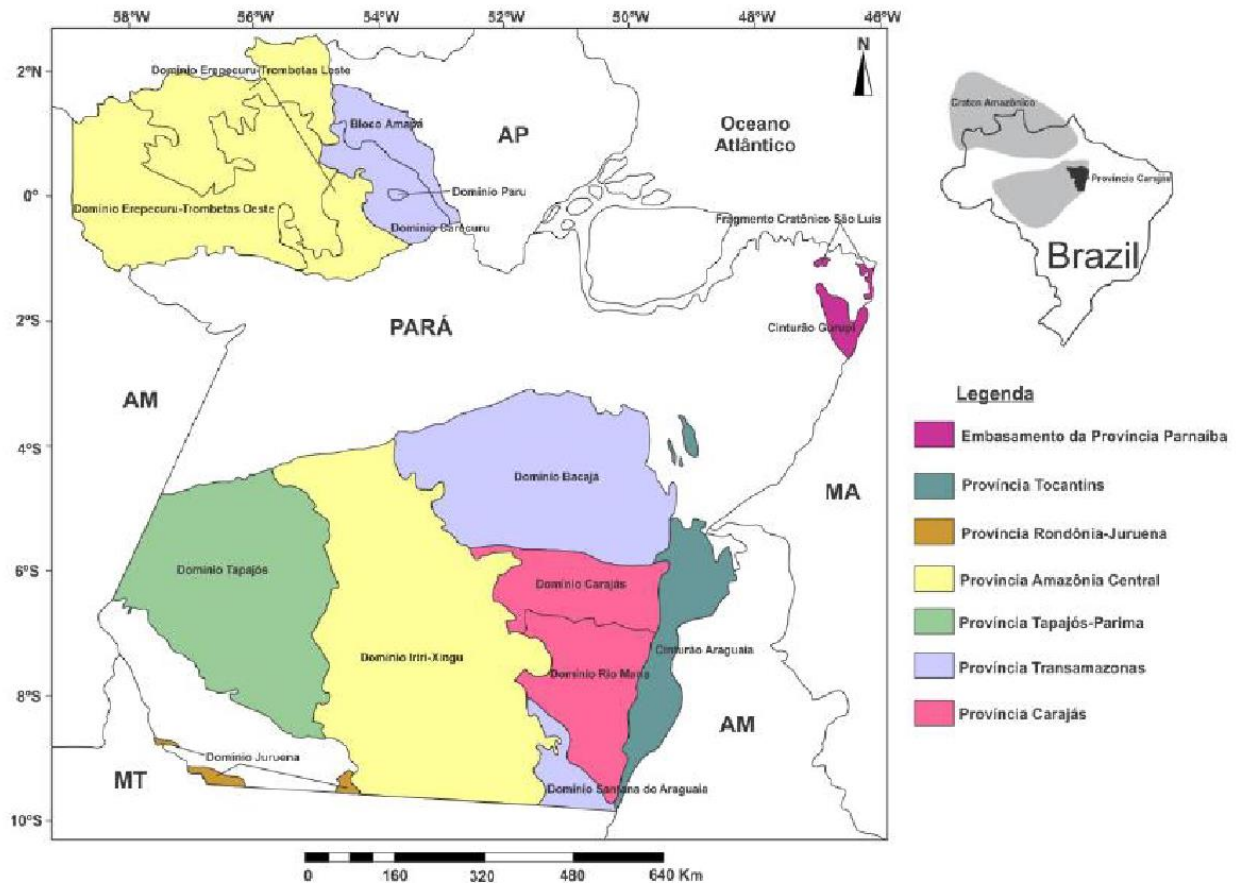
O Supergrupo Itacaiúnas é parcialmente recoberto por rochas siliciclásticas da Formação Águas Claras ( $2681 \pm 5$  Ma; zircão detrítico, Trendall *et al.* 1998) que é constituída por metaconglomerados, quartzitos, mármore, filitos carbonáticos e quartzitos sericíticos, interpretadas como formadas em ambiente marinho raso a fluvial (Nogueira *et al.* 1995).

No geral, três sistemas deformacionais com expressivas zonas de cisalhamento são reconhecidos e incluem: (i) Zona de Cisalhamento Cinzento, (ii) Zona de Cisalhamento de Carajás (iii) Zona de Cisalhamento Canaã. Essas grandes estruturas presentes no Domínio Carajás apresentam direção NW-SE e E-W. Elas são interpretadas como relacionadas a um encurtamento tectônico com vergência de NNE para SSW que produziu foliações, dobramentos, falhamentos reversos e transcorrentes de acordo com as interpretações de Pinheiro *et al.* (2013). Essas grandes estruturas também parecem funcionar como corredores importantes para fluidos hidrotermais e mineralizações

O modelo evolutivo do Domínio Carajás é dado por eventos orogênicos colisionais que ocorreu entre o final do neoarqueano e/ou início do paleoproterozóico, com reativações tardias. As assinaturas geoquímicas relevam evidências que as sequências supracrustais tiveram a gênese relacionada a um ambiente de rifte continental de crosta antiga (DOCEGEO 1988).

Araújo *et al.* (1988) defende que o modelo genético contempla estruturas de deformações que tiveram origem através de um regime de movimentação dextral, a qual permitiu a formação de uma bacia do tipo *pull-apart* com sistemas transcorrentes de significativas zonas de cisalhamento, como Carajás e Cinzentos. Por fim, a bacia foi tardiamente invertida por transpressão sinistral do embasamento mesoarqueano em estrutura de flor positiva, as quais foram sobrepostas pelas rochas supracrustais do Supergrupo Itacaiúnas. A Província Carajás é caracterizada pelo conjunto de rochas orientadas na

direção E-W, deformadas de forma progressiva por esforços de direção aproximada NNE-SSW (Pinheiro *et al.* 2013). O encurtamento regional produziu uma foliação E-W penetrativa, sistemas de dobras e falhas, incluindo as proeminentes falhas transcorrentes NW-SE, com formato sigmoidal em “S”, observadas nos mapas geológicos regionais.



**Figura 2.1:** Mapa das províncias e domínios tectônicos do Cráton Amazônico no Estado do Pará (Vasquez *et al.* 2008).

## 2.2 METALOGÊNESE DA PROVÍNCIA CARAJÁS

Muitos aspectos evolutivos e genéticos sobre os depósitos da Província Carajás ainda permanecem em aberto devido à diversidade geológica no diz respeito aos ambientes geotectônicos de formação, idades, rochas hospedeiras e processos hidrotermais. A Província Carajás compreende um núcleo crustal arqueano inserido na porção sudeste do Cráton Amazônico (Vasquez *et al.* 2008). Essa província representa uma das províncias minerais mais importantes do mundo, hospedando importantes depósitos de Fe (e.g. depósito Serra Norte, Minas N4 e N5), Mn (e.g. Mina do Azul), Fe-Cu-Au (e.g. Salobo, Igarapé Bahia e Sossego), Cu-Au (e.g. Breves, Santa Lúcia), Au (e.g. Serra Pelada) e Ni-EGP (e.g. Luanga).

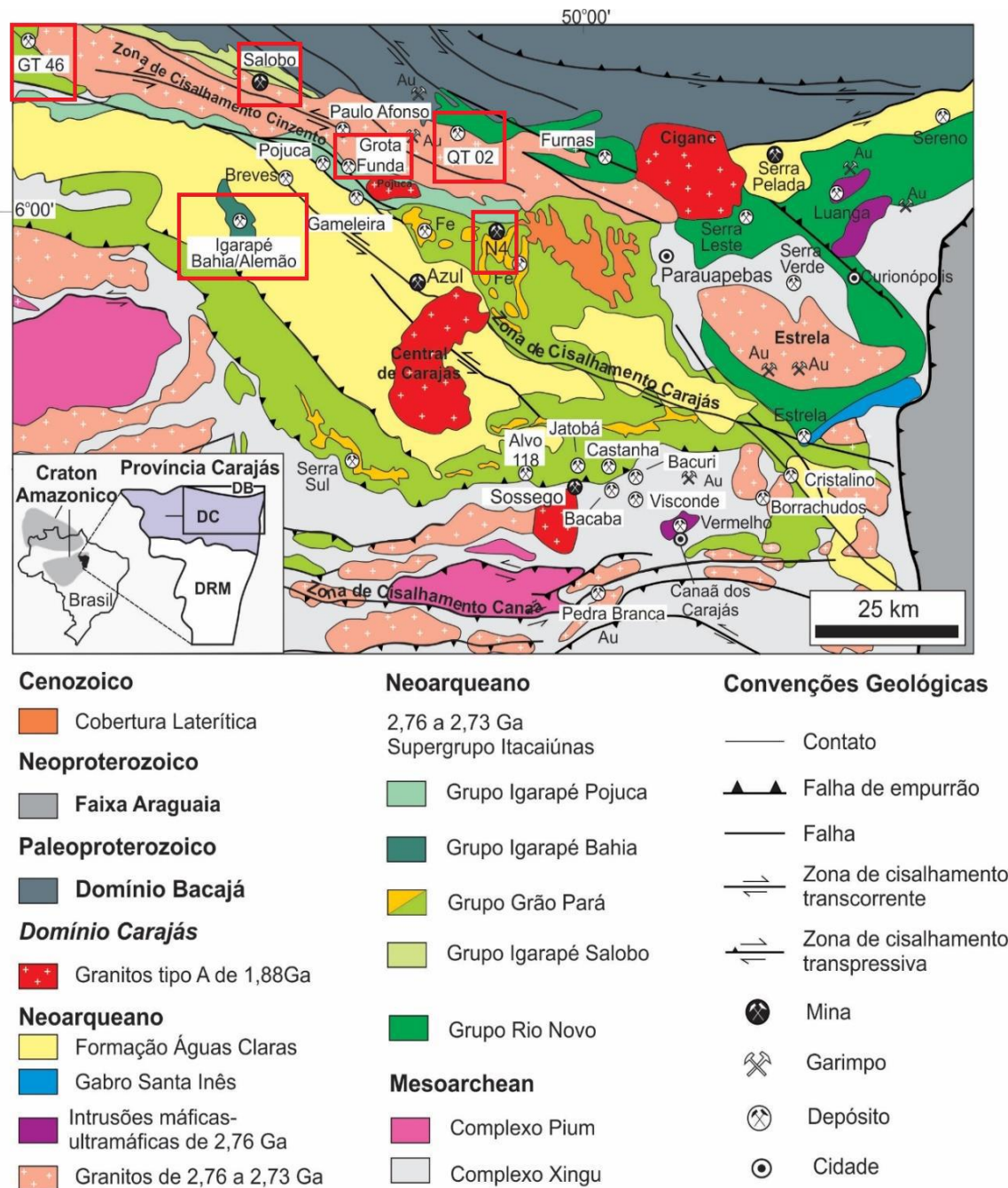
A região hospeda a maior concentração de depósitos IOCG de alta tonelagem do mundo (Monteiro *et al.* 2008), que incluem dos depósitos Salobo (1112 Mt @ 0,69 wt% Cu, 0,43 g/t Au, 55 g/t Ag; VALE 2012), Cristalino (500 Mt @ 1,0 wt% Cu; 0,3 g/t Au; Huhn *et al.* 1999), Sossego (355 Mt @ 1.1 % Cu e 0.28 g/t Au; Lancaster Oliveira *et al.* 2000), Igarapé Bahia/Alemão (219 Mt @ 1,4 wt% Cu, 0,86 g/t Au; Tallarico *et al.* 2005) e Alvo 118 (70 Mt @ 1,0 wt% Cu, 0,3 g/t Au; Rigon *et al.* 2000). No entanto, há ainda uma grande variedade de outros depósitos em avaliação, com grande importância para o conhecimento geológico da região, que incluem os depósitos GT-46, Furnas, Paulo Afonso, Grota Funda, QT-02 e AN-34 no norte, e Castanha, Bacaba, Bacuri, Jatobá, Visconde, Borrachudos e Pantera no sul (Melo 2018).

Os sistemas de falhas Carajás e Cinzento delineiam regiões de forte deformação ao longo de seus segmentos estruturais e indicam importantes depósitos de cobre-(ouro) (Pinheiro *et al.* 2013). O Grupo Grão Pará, onde hospedam a BIF, é composto por rochas de fácies xisto verde, rochas máficas, rochas metavulcânicas félsicas e meta-BIF (DOCEGEO 1988). O Grupo Grão Pará hospeda IOCG (GT-46 e Cristalino), Cu-Au-W-Bi-Sn  $\pm$  Mo (por exemplo, Estrela) e a grande ocorrência de minério de ferro (Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e Serra de São Félix).

Estudos recentes na Província Carajás sugerem a presença de quatro eventos mineralizantes principais (e.g. Moreto *et al.*, 2015a, b; Trunfull *et al.* 2018; Texeira *et al.* 2020). Esses eventos incluem i) 2,76 Ga: depósitos de ferro vulcano-exalativo (eg. N4, S11D) e depósitos de Cu-Zn tipo VHMS (eg. Pojuca); ii.) 2,71 – 2,68 Ga: depósitos IOCG no Cinturão Sul do Cobre (e.g. Corpo Sequerinho no depósito Sossego, Bacaba e Bacuri); ii) 2,61-2.55 Ga: depósitos IOCG no Cinturão Norte do Cobre (eg. Salobo e Alemão); iii) 1.88 Ga: Cu-(Au-Mo-W-Sn) tipo greisen (eg. Breves), Cu-Au-Mo-F (eg. Gameleira), Mn (eg. Buritirama e Azul) e Au-PGE (eg. Serra Pelada).

Os depósitos ferríferos, precipitados em 2,76 Ga, podem ser caracterizados como friáveis/porosos a maciços e/ou brechados, com presença de carbonatos (Figueiredo e Silva 2013). A alteração hidrotermal é baseada na transformação do jaspilitos em minérios de alto teor de óxidos de ferro, definido principalmente por uma sequência paragenética distinta com predomínio de processos que removem a sílica, introduzem carbonatos e formam veios contidos por quartzos, carbonatos (calcita e dolomita), hematita, sulfetos (calcopirita e pirita), monazita e localmente ouro. Os depósitos apresentam um estágio específico de alteração hidrotermal com zonas e espessuras variáveis. As três zonas de alteração associadas às BIF são: (1) zona distal, que representa uma alteração hidrotermal com influência de fluidos amagmáticos onde se observa presença de magnetita, (2) zona intermediária com média salinidade, martitização, aumento da porosidade em jaspilitos e influência de água meteórica e (3) zona proximal, que se refere a produtos de eventos de alteração precoce onde estão os minérios de maior teor.

Além dos grandes depósitos de ferro de Carajás, a província também hospeda importantes depósitos de cobre-(ouro). Esses depósitos podem ser divididos em (i) depósitos VMS-like (e.g. Pojuca); (ii) depósitos do tipo IOCG (e.g. Salobo e Sossego), (iii) depósitos do tipo granite-related (e.g. Breves e Santa Lúcia) e (iv) depósitos do tipo *Skarn* (e.g. Açai) (Xavier *et al.* 2012, Trunfull *et al.* 2020, Teixeira *et al.* 2020). O depósito de cobre Pojuca, principal representante dos depósitos semelhantes a depósitos do tipo VMS parece ter se formado nos estágios de abertura da bacia e deposição do Supergrupo Itacaiúnas, em 2,76 a 2,73 Ga. Recentemente, novos estudos têm apontado para a existência de mineralizações de cobre de assoalho oceânico neste período (e.g. Melo *et al.* 2019a, Melo *et al.* 2021).



**Figura 2.2:** Domínio Carajás com as principais formações geológicas e distribuições de depósitos (extraído de Vasquez *et al.* 2008). Em vermelho os principais depósitos onde foram coletadas as amostras de BIF.

Em contrapartida, os depósitos IOCG representam as principais reservas de cobre de Carajás e do Brasil (Juliani *et al.* 2016). Esses depósitos foram formados durante três eventos mineralizantes principais em (i) 2,71 – 2,86 Ga (Corpo Sequerinho no Depósito Sossego); (ii) 2,55 Ga (Depósito Salobo) e (iii) 1,88 Ga (Alvo 118) (Moreto *et al.*, 2015a, b). Esses depósitos apresentam padrões de alteração hidrotermal, estilos de mineralização e condições de formação distintas a depender do evento que foram formados.

Por fim, durante o Paleoproterozoico e a colocação do extenso magmatismo de 1,88 Ga, diversos depósitos de cobre foram formados. Neste caso, depósitos do tipo granite-related com associação a greisens são os principais representantes deste evento (Tallarico *et al.* 2003; Hunger *et al.* 2021). Os principais e sucessivos eventos mineralizantes do Cráton Amazônico (2,76; 2,61-2,55 e 1,88 Ga) ocorreram durante o rifteamento e a quebra de supercontinentes, a exemplo de Ur, Kenorland e Colúmbia. A Província Mineral de Carajás e a Província Aurífera Tapajós (localizada no Cráton Amazônico imediatamente à oeste daquela) estão respectivamente localizadas em quilha e bordas cratônicas. A Província Mineral de Carajás experimenta uma metalogenia típica de rifte de manto litosférico sub-continental e a segunda Província Aurífera Tapajós resulta do magmatismo tipo-A disseminado, associado à anatexia crustal promovida por underplating (Dall’Agnol *et al.* 1999) e impacto de pluma na borda do cráton.

### **2.3 OCORRÊNCIA DE BIF NA PROVÍNCIA CARAJÁS**

O Supergrupo Itacaiúnas foi depositado durante o Neoarqueano e entre suas unidades são reconhecidas também sequências de formações ferríferas bandadas. Tavares *et al.* (2018) considera que essas formações ferríferas bandadas constituem unidades intermediárias do Supergrupo Itacaiúnas, o qual hospeda diversos depósitos do tipo IOCG (e.g. Salobo, Sossego e Igarapé Bahia; Xavier *et al.* 2012). Essas BIF estão distribuídas principalmente no Grupo Igarapé Bahia, Grupo Grão Pará e Formação Carajás. Os grandes depósitos ferríferos da Província Carajás são únicos em sua configuração dentro de uma sequência vulcanossedimentar arqueana fortemente influenciada por um sistema magmático-meteorico hidrotermal, em comparação com os outros dois depósitos de BIF no mundo, conhecimento como Hamersley (Austrália) relacionado com bacias sedimentares e os as BIF em sistemas metamórficos como o Quadrilátero Ferrífero (Brasil).

A BIF mais importante compreende as formações ferríferas bandadas da Formação Carajás, inserida estratigraficamente ao centro do Grupo Grão Pará (DOCEGEO 1988) e contém camadas e lentes descontínuas de jaspilitos e minérios de ferro compactos a brandos com presença de intrusões de diques máficos (Figueireido & Silva 2013).

A assinatura de alteração hidrotermal distinta presente em rochas basálticas hospedeiras e jaspilitos, em combinação com distintas assinaturas de química de fluidos, indicam fluxos de água





De acordo com o Justo (2018), modelo da alteração supergênica sustenta as razões do enriquecimento em ferro das BIF de Carajás. Para gênese de minério hematítico de alto teor, a alteração hipogênica-hidrotermal prévia ao enriquecimento residual de ferro possui uma importância significativa. Modelos hipogênicos consideram diversos fatores condicionantes do minério, como a composição do protominério (com ou sem carbonato); o intervalo temporal entre alteração hipogênica e deformação; os tipos de fluidos hidrotermais ricos em ferro (fumarolas de alta temperatura, águas meteóricas aquecidas, fluidos magmáticos). Segundo Lobato *et al.* (2005), as mineralizações de ferro se desenvolveram no paleoproterozóico, sobre rochas exumadas da sequência metavulcanossedimentar arqueana. Devido à estruturação arqueana, o aumento da permeabilidade local das rochas teria favorecido circulação de fluido rico em ferro, gerando corpos de alto teor do metal ainda no paleoproterozoico. O aumento nas concentrações de ETR em amostras de minério do N4E e N5E sugere participação de fluidos mineralizantes com ferro em grandes quantidades. Tentativamente, Lobato *et al.* (2005) e Figueiredo e Silva (2009) sugerem correlação entre a formação dos depósitos de ferro de alto teor e a formação de depósitos magmáticos e hidrotermais ricos em Cu e Au, incluindo os depósitos IOCG.

Os jaspilitos exibem estruturas e texturas primárias, como como microfalhas sin-sedimentares e esferulitos. A BIF contendo dolomita consiste em camadas de dolomita e sílex em proporções variadas, alternando com camadas escuras de óxido de ferro. A BIF com dolomita tem aproximadamente 50 metros de espessura estendendo-se por cerca de 400 m ao longo da direção, e é interpretado como fácies carbonatada (Figueiredo e Silva *et al.* 2012).

Subordinadamente, diversos corpos de formações ferríferas bandadas também são reconhecidos em depósitos do tipo IOCG. Essas BIF são principalmente caracterizadas nos depósitos GT-46, Grotta Funda, Igarapé Bahia e AN-34/QT-02 (Toledo *et al.* 2019, Hunger *et al.* 2019, Melo *et al.* 2019b). Nestes casos, porém, o reconhecimento das feições primárias das BIF é prejudicado pela intensa alteração hidrotermal do sistema IOCG. No depósito Igarapé Bahia, as BIF são pertencentes ao Grupo Igarapé Bahia, enquanto nos depósitos GT-46, NA-34/QT-02 e Grotta Funda elas fazem parte da Formação Salobo-Pojuca.

As BIF desses depósitos são bem menos conhecidas em termos de aspectos descritivos e processos genéticos quando comparadas às BIF da Formação Carajás. O depósito QT-02, por sua vez, parece ainda preservar parte de BIF que gradam para zonas com alteração Fe-K (granada-grunerita-magnetita-biotita; Santos 2020). De acordo com Figueiredo e Silva *et al.* (2012), os jaspilitos apresentam características de bandamentos máficos e félsicos centimétricos, mesocamadas (cerca de 5 cm de espessura) e microcamadas compostas por camadas de óxido de ferro intercaladas com camadas de jaspilitos e *chert*, respectivamente.

Devido a composição da litoestratigrafia predominante das formações ferríferas bandadas da Província Carajás terem associação com rochas vulcânicas e vulcanoclásticas, e não sedimentares, tem

vido difícil inserir as BIF de Carajás em um dos esquemas de classificação mundialmente aceitos (Algoma, Lago Superior, etc.).



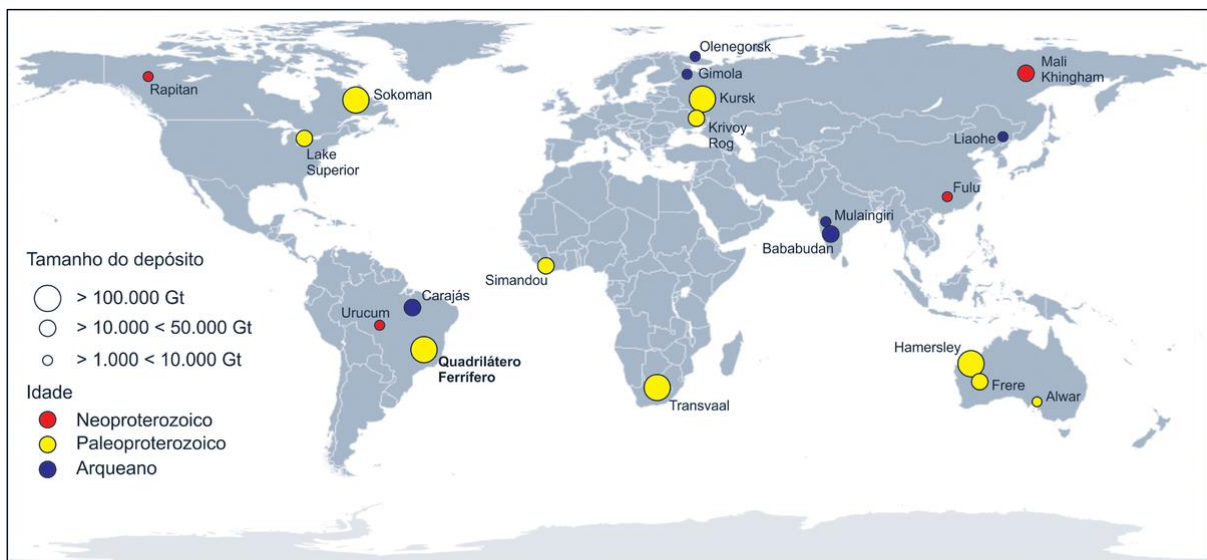
## CAPÍTULO 3

### FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS

#### 3.1 TIPOS E GÊNESE DE FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS

As formações ferríferas bandadas (BIF) são as precursoras de depósitos de ferro e sua gênese está relacionada entre o pré-cambriano (3,8-1,8 Ga), principalmente na transição neoarqueano-paleoproterozóico (2,5 Ga). As BIF vêm sendo interpretadas como produtos sedimentares da complexa interação entre processos mantélicos, tectônicos, oceânicos e biológicos, envolvendo litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera (Bekker *et al.* 2010).

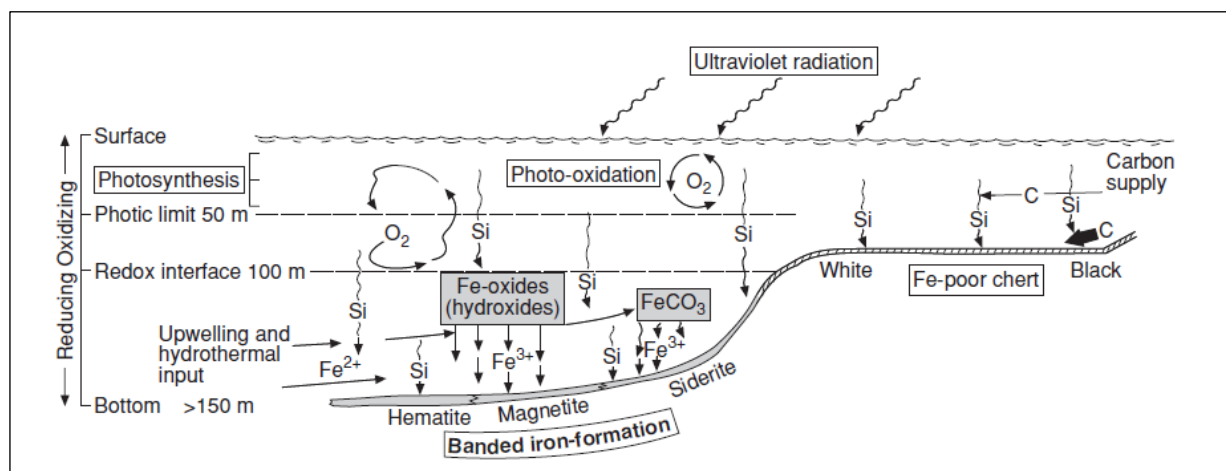
De acordo com Trendall (1983), as formações ferríferas bandadas podem ser divididas em fácies óxido, sulfeto, carbonato e silicato conforme a mineralogia predominante associada ao mineral de ferro. As formações ferríferas bandadas dos tipos Algoma e Superior mostraram representatividade global e passaram a indicar sedimentação rica em ferro associada respectivamente a vulcanismo submarino em *greenstone belts* arqueanos, e amplas plataformas sedimentares paleoproterozoicas.



**Figura 3.1:** Distribuição dos principais depósitos e prospectos de ferro no mundo. Bekker *et al.* (2010)

Várias hipóteses tentam explicar fontes de sílica e ferro nas BIF, e seus respectivos mecanismos de transporte e deposição. Basicamente há duas fontes principais de ferro reconhecidas para formação de BIF de idades pré-cambrianas. Uma delas é em grande maioria de origem hidrotermal, que está relacionada a atividade vulcânica, e outra, geralmente ligada a processos de intemperismo continental.

Em ambientes marinhos anóxicos, o ferro é transportado em formato  $Fe^{2+}$  em solução, enquanto o  $Fe^{3+}$  é transportado adsorvido à carga em suspensão (Justo 2018).



**Figura 3.2:** Modelo sobre a oxidação de ferro a partir de uma fonte oceânica para explicar ambiente deposicional para formações ferríferas bandadas. Fonte: Robb (2006).

Considera-se que, para precipitar uma formação ferrífera bandada, é necessário oxidar o  $Fe^{2+}$ , solúvel na água do mar, em  $Fe^{3+}$ , insolúvel, que desta forma precipita-se no fundo oceânico formando os depósitos sedimentares. Durante o Arqueano e até o início do Paleoproterozoico, cerca de 4 a 2,5 bilhões de anos atrás, uma grande quantidade de  $Fe^{2+}$  pôde ser acumulada em solução nos oceanos do planeta, porque a atmosfera era basicamente livre de oxigênio. Este  $Fe^{2+}$  vinha principalmente da atividade vulcânica submarina, especialmente em períodos de alta fertilidade magmática devido a alterações mantélicas, quando as Grandes Províncias Ígneas foram desenvolvidas (Bekker *et al.* 2010).

### 3.2 MINERALOGIA, TEXTURAS E MICROESTRUTURAS EM BIF

Existem aproximadamente 300 minerais que possuem o ferro como componente essencial, mas destes, apenas os óxidos apresentam concentrações suficientes para serem tratados como minerais de minério. O ferro nativo, isto é, o ferro que se encontra fora da estrutura de algum mineral, é raro na natureza. O minério de ferro consiste principalmente na presença maciça de óxidos de ferro, cujas formas primárias são a magnetita ( $Fe_3O_4$ ) e a hematita ( $Fe_2O_3$ ). Além destes óxidos, o ferro ocorre ainda naturalmente na forma de hidróxidos (p. ex. goethita e limonita), sulfetos (pirita, calcopirita e pirrotita), carbonatos (p.ex. siderita e ankerita) e em silicatos (greenalita e anfibólios como riebeckita e grunerita).

A assembleia mineral característica das formações ferríferas bandadas preservadas ou pouco afetadas por metamorfismo é, geralmente, composta de *chert*, hematita, magnetita, carbonatos (série dolomita-ankerita e siderita), greenalita, stilpnomelano, riebeckita e por minnesotaíta. A progressão das

condições metamórficas resulta em BIF com assembleia mineral contendo silicatos de ferro de maior temperatura, sequencialmente, Fe-anfibólios, Fe-piroxênios e Fe-olivinas (Klein 2005).

Em geral, as formações ferríferas associadas aos *greenstone belts* ocorrem deformadas, metamorfizadas e desmembradas; enquanto àquelas depositadas em plataformas continentais tendem a ser contínuas, preservadas de metamorfismo e deformação intensas. Textura microbandada é observada na maioria das formações ferríferas entre 3,8-2,2 Ga (BIF), em contraste à textura granular exibida em formações ferríferas entre 2,2-1,8 Ga (GIF), formadas após o GOE (Grande Evento de Oxidação).

### **3.3 METAMORFISMO, DEFORMAÇÃO E ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL EM BIF**

Os maiores e mais importantes depósitos de minério de ferro do mundo encontram-se hospedados em formações ferríferas bandadas, rochas de origem sedimentar química. No entanto, é válido ressaltar que nem toda formação ferrífera bandada compreende minério de ferro. As BIF são rochas com teores de ferro maiores que 15%, enquanto o minério de ferro necessita valores próximos a 60%.

A alteração hidrotermal destas rochas, que contam geralmente com cerca de 30 a 35% de Fe em sua composição, pode elevar o seu teor em Fe para acima de 60%, gerando os chamados depósitos de alto teor, a mais importante fonte de ferro no mundo.

Os outros tipos de depósitos de ferro (Kiruna / Lahn-Dill, *Skarn*, Clinton-Minette) apresentam importância secundária em relação aos depósitos hospedados em formações ferríferas bandadas (Hagemann *et al.* 2006).

As diversas camadas de estratificação nas formações ferríferas bandadas (BIF) podem estar associadas a fenômenos cíclicos (anuais, solares, controlados por marés e Milankovitch). A alternância regular entre camadas ricas em sílica e em ferro tem sido objeto de interpretação controversa, sendo considerada tanto como um registro do equilíbrio entre atividades hidrotermais submarinas quanto como originada do intemperismo continental. A natureza primária ou secundária dessa alternância periódica é frequentemente questionada. A estrutura característica das BIF está diretamente ligada ao resultado do processo diagenético. Neste contexto, as camadas ricas em ferro seriam representativas da compactação de sedimentos predecessores das BIF, com liberação vertical de sílica.

O depósito de minério de ferro alojado em formações ferríferas bandadas (Hagemann *et al.*, 2006) representa os maiores e mais ricos depósitos de minério de ferro do mundo. Esse sistema é predominantemente influenciado por fatores estruturais, principalmente através de extensos sistemas de falhas, que facilitam a circulação de grandes volumes de fluidos hidrotermais entre as formações ferríferas bandadas durante eventos deformacionais tardios ou mesmo durante eventos extensionais

associados à formação das bacias. Durante o Cenozoico, fluidos supergênicos também podem acessar essas estruturas, resultando em uma segunda mobilização dos elementos e na formação de depósitos do tipo laterítico.

A evolução das formações ferríferas bandadas para depósitos de minério de ferro é influenciada pela permeabilidade estrutural, pelas alterações hipogênicas causadas por fluidos profundos (magmáticos ou basálticos) e por águas meteóricas antigas, além do possível enriquecimento supergênico subsequente. Na maioria dos grandes depósitos, observam-se três principais estágios hipogênicos e um estágio supergênico (Hagemann *et al.* 2006):

- Lixiviação de sílica, formação de magnetita e, localmente, carbonato;
- Oxidação da magnetita para hematita (martitização), continuando a dissolução do quartzo e formação de carbonato;
- Continuação da martitização, substituição de silicatos de ferro por hematita, microtabular ou especularita, e dissolução dos carbonatos, e
- Substituição da magnetita e dos carbonatos remanescentes por goethita e magnetita, além da formação de minerais fibrosos de quartzo e argilominerais.

De acordo com Hagemann (2006), as formações ferríferas bandadas (BIF) podem passar por processos de alteração hidrotermal e metamorfismo que resultam em mudanças significativas na mineralogia, textura e composição química dessas rochas sedimentares ricas em ferro. Na alteração hidrotermal em BIF, a hematita, um dos minerais predominantes nas BIF, pode ser substituída por outros minerais de óxido de ferro, como a magnetita e a goethita, como descrito por Hagemann (2006).

Já no metamorfismo em BIF, novos minerais, como a grunerita e a clorita, podem ser formados em detrimento dos minerais originais presentes nas rochas. A intensidade e o tipo de alteração hidrotermal e metamorfismo em BIF dependem de diversos fatores, como a temperatura, a pressão, a composição química dos fluidos hidrotermais, a duração da circulação dos fluidos e a composição mineralógica original das BIF, conforme destacado pelo autor. Hagemann (2006) ressalta que a compreensão dos processos de alteração hidrotermal e metamorfismo em BIF é fundamental para a exploração e utilização dessas formações geológicas, especialmente na formação de depósitos minerais, como depósitos de minério de ferro.

Além disso, esses processos também podem influenciar a evolução geológica de uma região. Portanto, é importante considerar esses processos quando se estuda a geologia e a evolução das regiões onde as BIF estão presentes.



4.1 CARACTERÍSTICA MACROSCÓPICA DAS BIF

Nesta sessão será apresentada a comparação e correlação das principais características macroscópicas de formações ferríferas bandadas pertencentes aos depósitos Igarapé Bahia, Grota Funda, GT-46, QT-02 e afloramentos regionais (Figura 4.1), as quais estão inseridas em unidades neoarqueanas que correspondem ao grupo Igarapé Bahia e formações Salobo-Pojuca e Carajás.

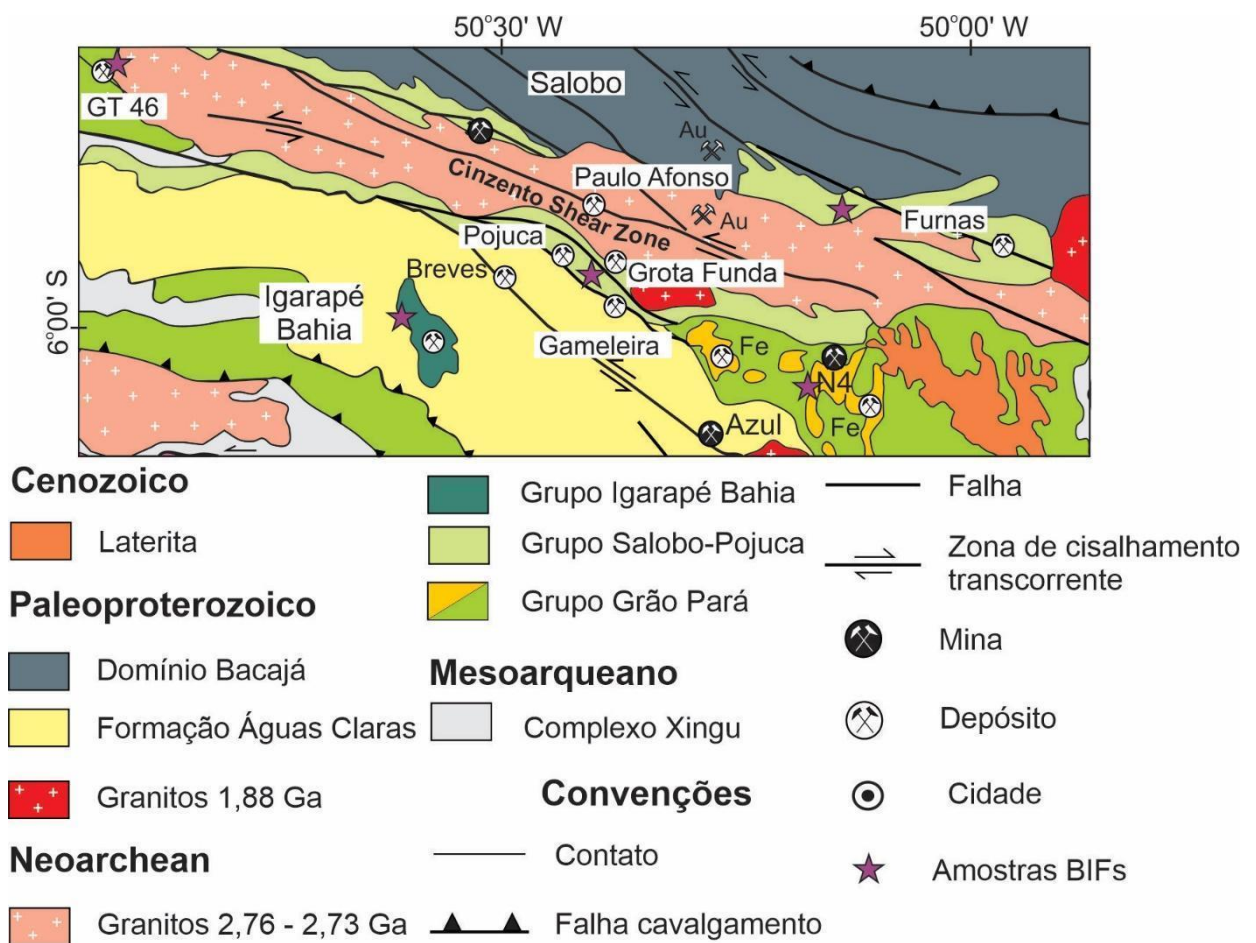
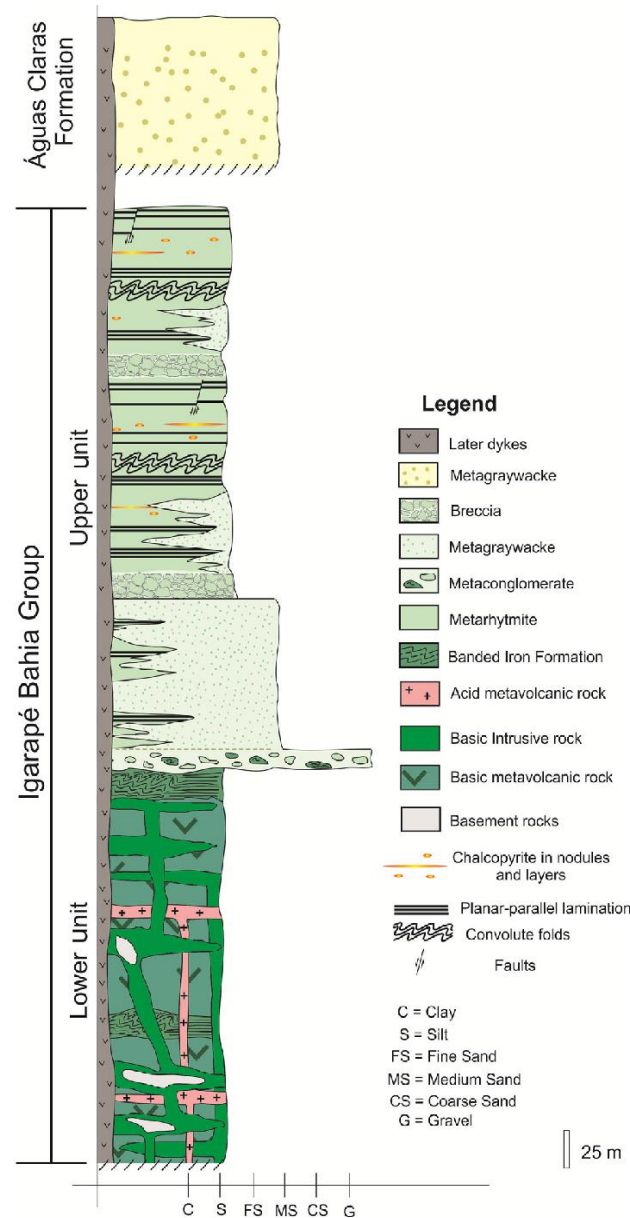


Figura 4.1: Mapa geológico simplificado da porção norte do Domínio Carajás destacando a localização das amostras de BIF analisadas neste trabalho (estrela roxa). Modificado de Vasquez et al. (2008).

4.1.1 Formações ferríferas bandadas no Grupo Igarapé Bahia

O Grupo Igarapé Bahia é formado por uma sequência metavulcanossedimentar de baixo grau metamórfico dividida em unidade inferior, a qual compreende rochas metavulcânicas e metagabros, e

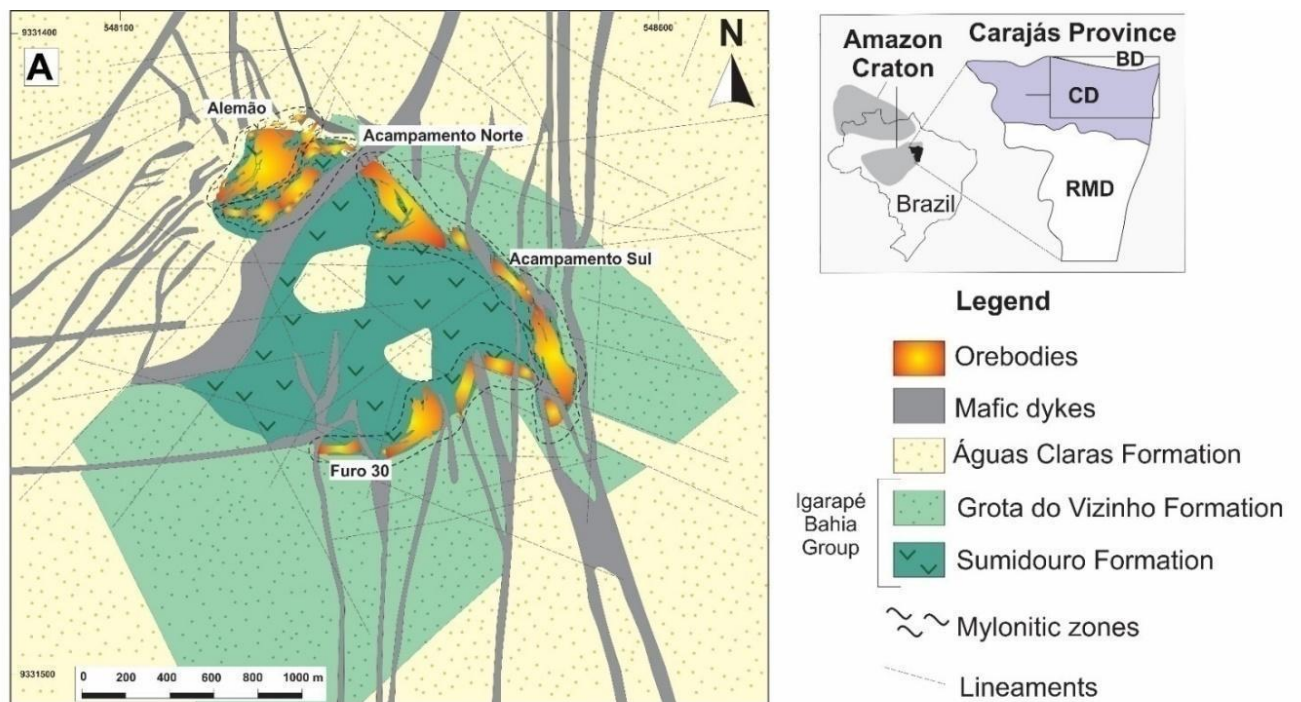
em unidade superior com metarritmitos, rochas epiclásticas e formação ferrífera bandada, além da Formação Águas Claras, que engloba principalmente rochas epiclásticas (DOCEGEO 1988; Melo *et al.* 2019). A BIF da unidade inferior ocorre em rochas metavulcânicas máficas com até um metro de espessura ou como clastos em brechas hidrotermais, enquanto a BIF da unidade superior ocorre como clastos com alternância de lâminas milimétricas de magnetita e centimétricas de sílex em metaconglomerados (Melo *et al.* 2019), cujas camadas pode ter até dez metros de espessura (Figura 4.2).



**Figura 4.2:** Coluna estratigráfica com a seqüência metavulcanossedimentar do Grupo Igarapé Bahia e da Formação Águas Claras e níveis mineralizados (Melo *et al.* 2019).

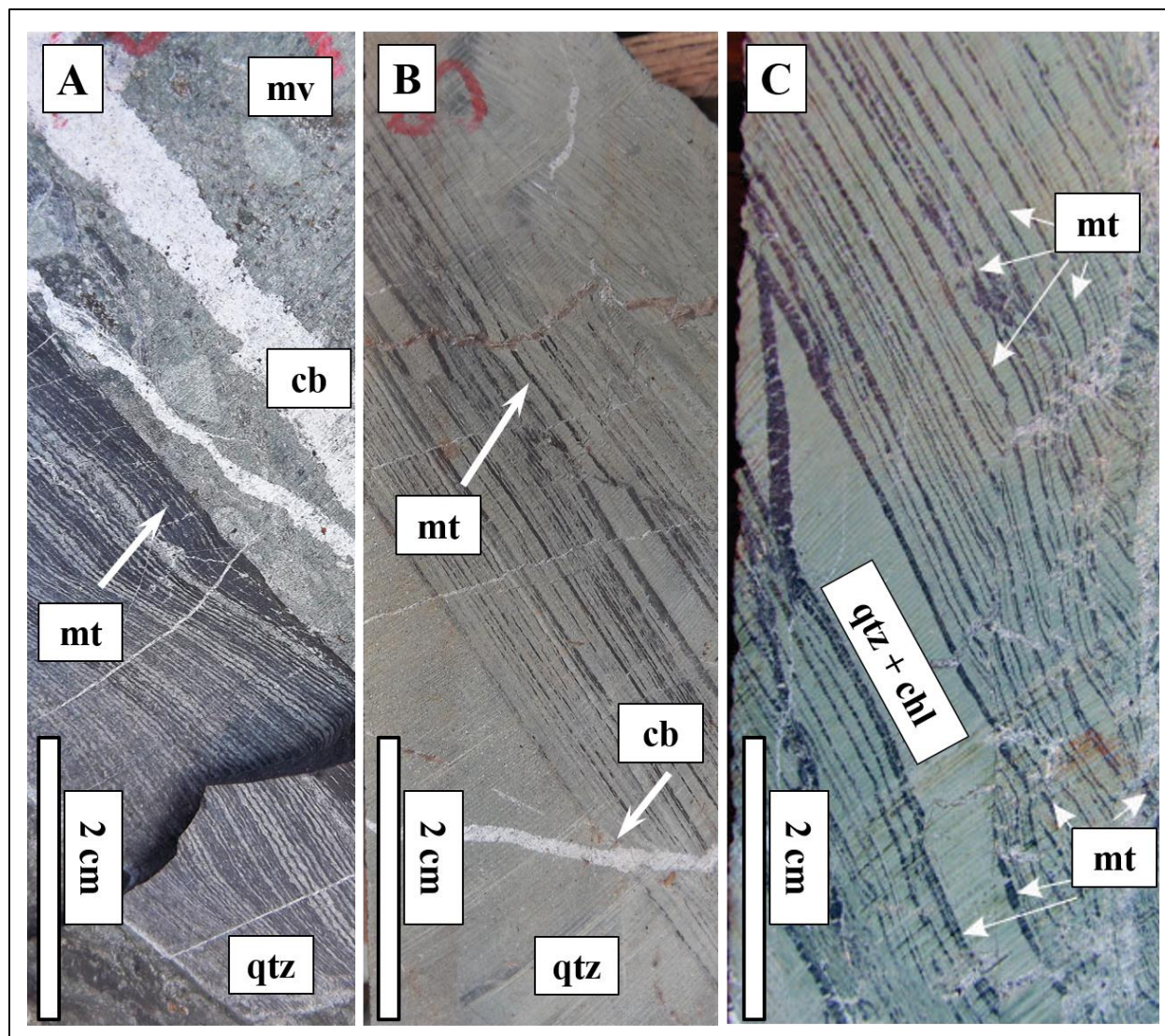
As rochas metavulcanossedimentares do Grupo Igarapé Bahia são hospedeiras do depósito IOCG Igarapé Bahia em seus quatro corpos mineralizados (Alemão, Acampamento Norte, Acampamento Sul e Furo 30; Figura 4.3). As BIF ocorrem intercaladas com metarritmitos, e subordinadamente em rochas vulcânicas hidrotermalizadas (Figura 4.4A; Melo *et al.* 2019). O sistema

hidrotermal IOCG é similar nos quatro corpos de minério e compreende alterações hidrotermais dos tipos cálcico-sódica (actinolita, escapolita, clinozoisita, epidoto e titanita), potássica-férrica (biotita), seguida da formação de turmalina e carbonato e cloritização tardia. A formação de clorita é considerada a principal alteração hidrotermal no depósito Igarapé Bahia e evolui até zonas proximais contendo a mineralização, ao qual ocorre em associação com carbonato e magnetita em zona de cisalhamento (Melo *et al.* 2019).



**Figura 4.3:** Mapa geológico exibindo os quatro corpos lenticulares e mineralizados do depósito Igarapé Bahia (Vale in Melo *et al.* 2019).

As amostras de BIF aqui estudadas mostram textura de faixas milimétricas, em que as bandas são caracterizadas por camadas alternadas de quartzo (na forma de chert) e óxidos de ferro (principalmente magnetita), com raras ocorrências de veios milimétricos de carbonato (Figura 4.4A). Os contatos entre esses dois tipos de bandas são em sua maioria nítidos e bem definidos (Figura 4.4B), independente da foliação milonítica superimposta. O chert microcristalino ( $\sim 0,05$  mm) aparece como mesobandas ( $\sim 1-5$  cm) e microbandas (0,25–1 mm), e exibe cor acinzentada. As partes dominantes das bandas de óxido de ferro são pretas e opacas, enquanto suas partes menores são cinza-escuras devido às microbandas de sílex intercaladas (Figura 4.4C).



**Figura 4.4:** Aspectos macroscópicos das formações ferríferas bandadas do Grupo Igarapé Bahia. (A) Contato entre BIF e rocha metavulcânica, veios tardios de quartzo-carbonato-calcopirita sobrepondo sequência mineralizada. (B) BIF exibindo foliação milonítica subvertical e veio tardio de quartzo-carbonato-calcopirita interceptando estrutura primária. (C) Bandamento de magnetita intercalado com quartzo e clorita tardia, além de evidente registro de deformação dúctil. Mt: magnetita, qtz: quartzo, cb: carbonato, mv: metavulcânica, chl: clorita.

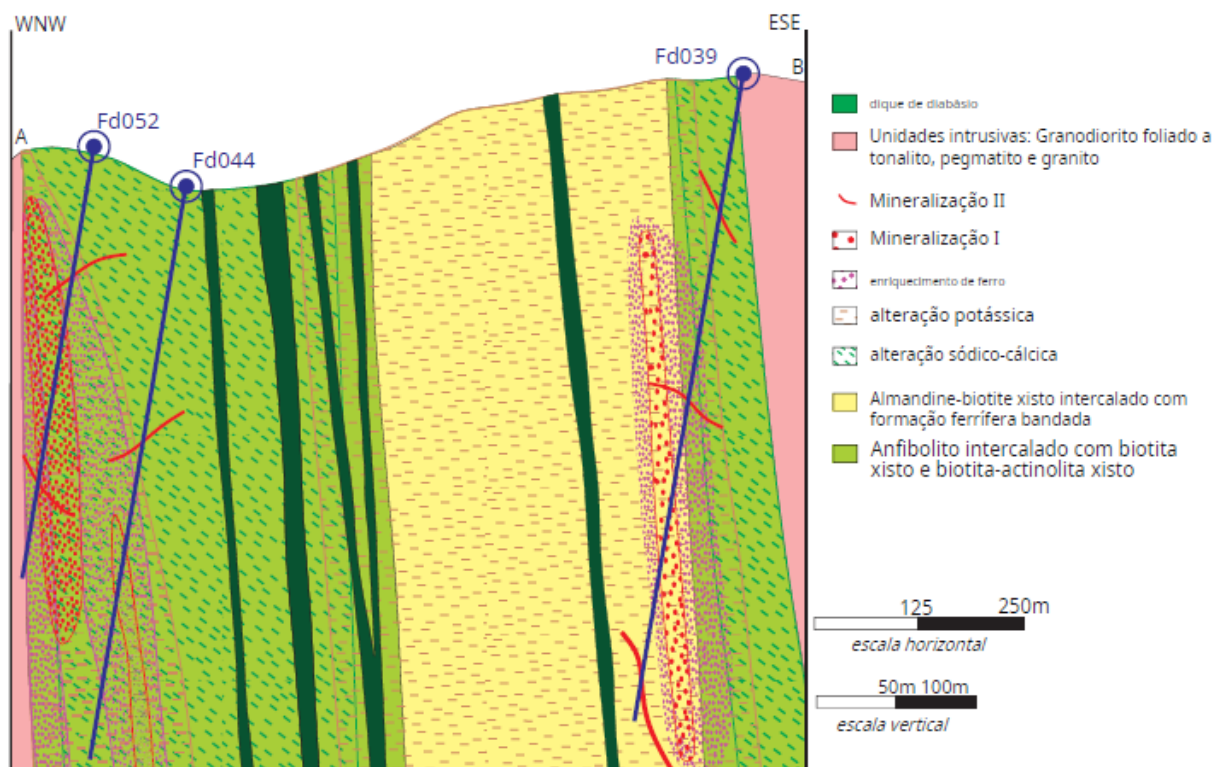
#### 4.1.2 Formações ferríferas bandadas da Formação Salobo-Pojuca

A Formação Salobo-Pojuca está inserida no Supergrupo Itacaiúnas e, além de BIF, inclui gnaisses, anfibolitos, quartzitos, metagrauvascas, metavulcânicas básicas e xistos (DOCEGEO 1988). Na porção central, as deformações e alterações hidrotermais são mais intensas, e possuem assembleia mineral característica bem desenvolvida (Melo *et al.* 2016). Para este contexto, são apresentadas as BIF dos depósitos GT-46, AN-34 e QT-02.

#### 4.1.2.1 Depósito GT-46

Representado por sequência metavulcanossedimentar, o depósito GT-46 está localizado na porção noroeste da Zona de Cisalhamento Cinzento, e compreende anfibolitos alternados com biotita xisto e actinolita-biotita xisto em transição gradual para almandina-biotita xisto com BIF metamorfizadas intercaladas. Além disto, a sequência é interceptada por tonalito foliado, granodiorito, pegmatito, granito e diques de diabásio (Figura 4.5; Toledo *et al.* 2019).

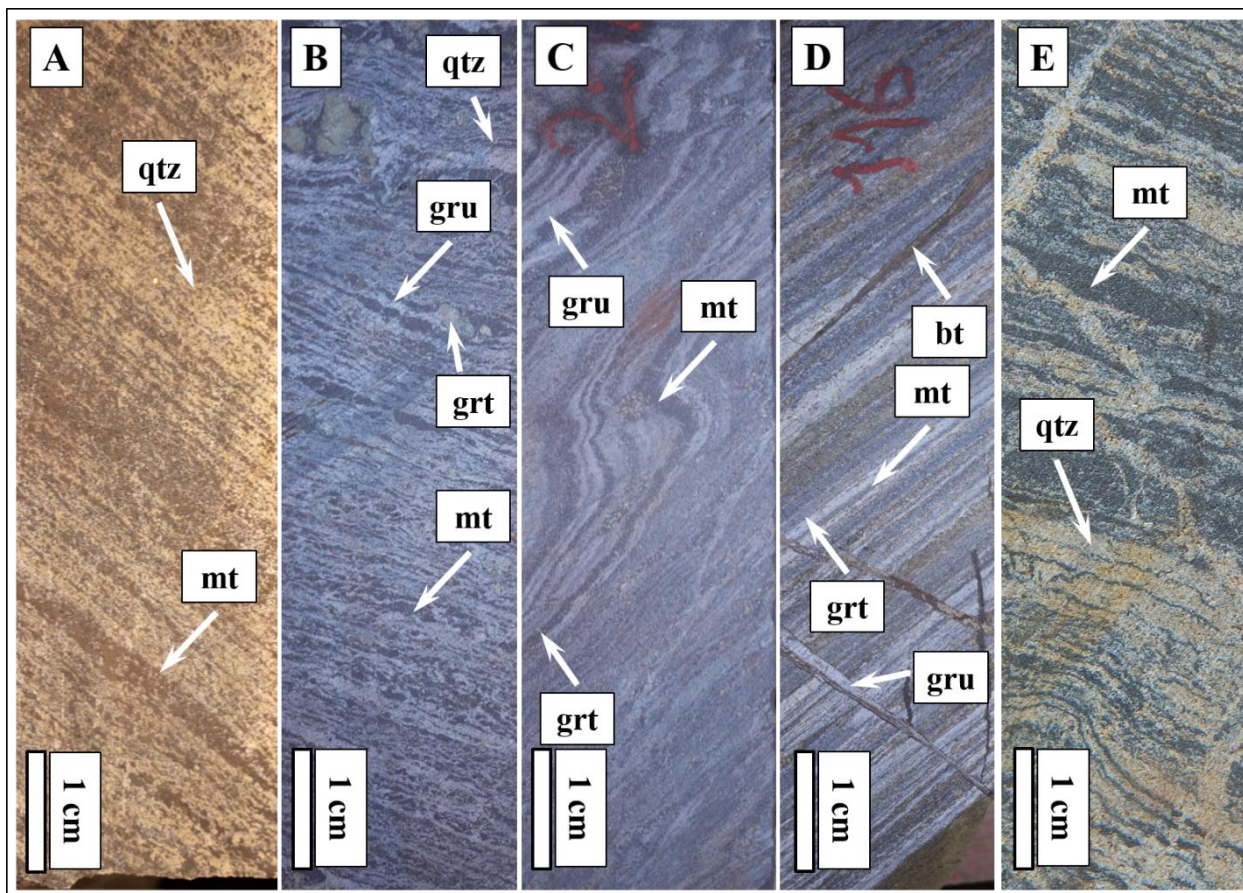
O depósito GT-46 registra sobreposição de distintos estágios de alterações hidrotermais. O primeiro evento é caracterizado por metassomatismo sódico-cálcico e potássico, seguido de alteração férrica associada a mineralização disseminada (calcopirita-bornita-magnetita) controlada por estruturas dúcteis; e a ocorrência de veios e brechas representam o segundo episódio de mineralização (calcopirita-magnetita-clorita-calcita-quartzo). Evento tardio é marcado pela formação de clorita relacionada a intrusões de pegmatito (Toledo *et al.* 2019).



**Figura 4.5:** Seção geológica simplificada do Depósito GT 46 exibindo a relação entre as rochas hospedeiras, alterações hidrotermais e níveis mineralizados (Toledo *et al.* 2019).

Caracterizadas no estudo de Toledo *et al.* (2019), as BIF do depósito GT-46 são de granulação média a grossa, cinza, laminadas com camadas de quartzo e magnetita que podem variar de 1 mm a 2 cm (Figura 4.6A). Fases como grunerita e almandina, em menor proporção, também são reportadas. A alteração hidrotermal é marcada por hastingsita, biotita, escapolita, magnetita maciça, calcopirita e

bornita. Estes minerais ocorrem entre os contatos ou ao longo das clivagens ou fraturas dos minerais metamórficos seguindo a foliação.



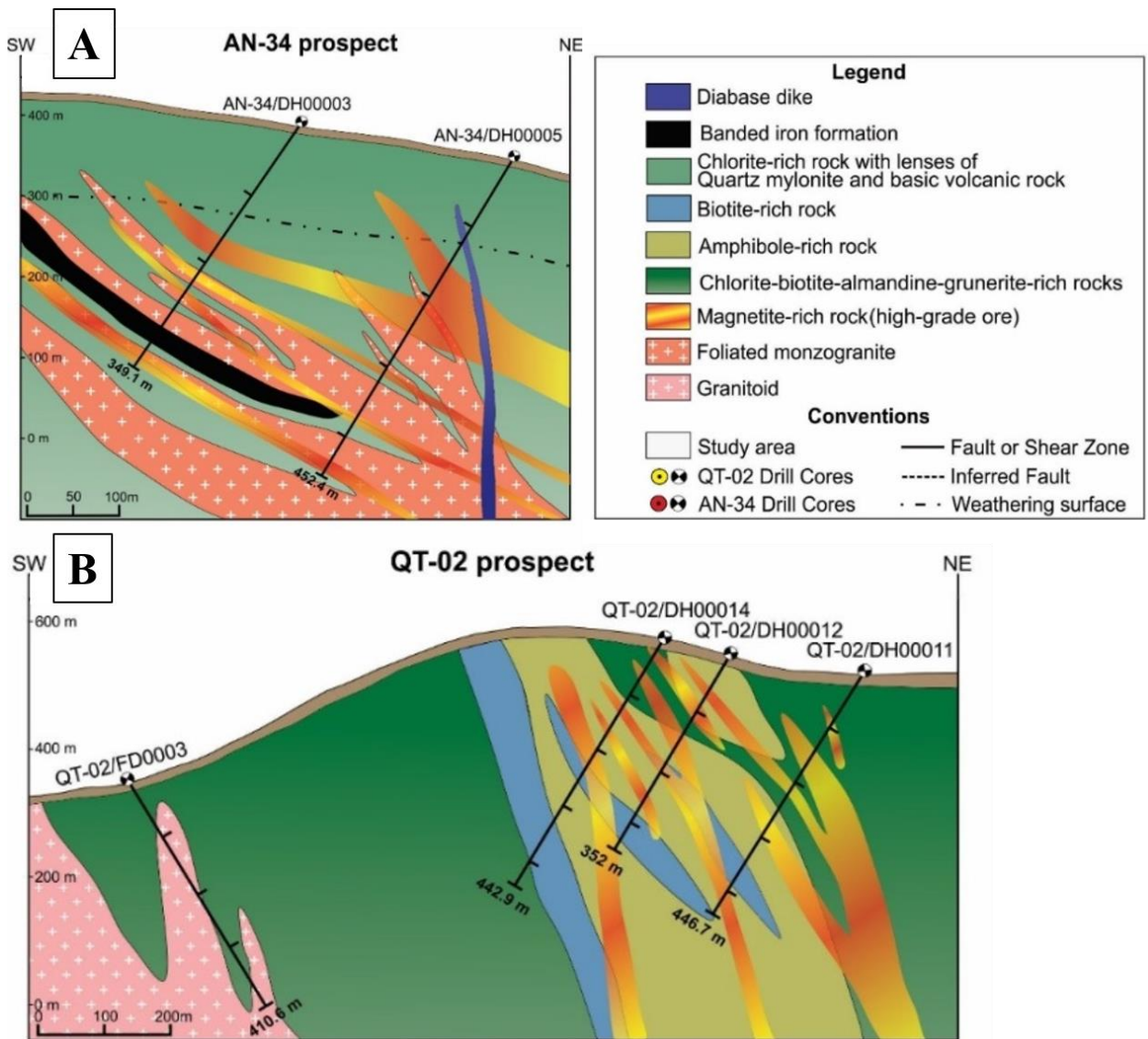
**Figura 4.6:** Formações ferríferas bandadas típicas dos depósitos da Formação Salobo-Pojuca. (A) GT-46 com camadas milimétricas de quartzo e magnetita. (B, C, D) QT-02 mostrando gradação para alteração principal superimposta, por vezes pervasiva, com granada-grunerita-biotita, zonas dobradas e venulação tardia. (E) Grotta Funda com estratificação composicional intercalando quartzo e magnetita. Qtz: quartzo, mt: magnetita, gru: grunerita, grt: granada, bt: biotita.

#### 4.1.2.2 Depósitos AN-34 e QT-02

Os depósitos AN-34 (Figura 4.7A) e QT-02 (Figura 4.7B) estão localizados na porção centro-leste da Zona de Cisalhamento Cinzento. As rochas hospedeiras, principalmente BIF, apresentam intensa deformação marcada por sequência de milonitos a ultramilonitos e alteração hidrotermal (Figura 4.7; Toledo et al. 2019). Embora feições reliquias ainda sejam observadas, como o bandamento composicional primário das BIF, o metassomatismo posterior oblitera parcial a totalmente as características e texturas originais dos minerais (Figura 4.6B). A ocorrência de granitoides e diques de diabásio tardios também é descrita (Santos 2020).

As principais zonas de alteração hidrotermal incluem metassomatismo sódico (albita), silicificação, potássico (biotita, turmalina) e alteração férrica relacionada a mineralização cuprífera

principal (calcopirita-bornita-pirita). Estágios tardios são marcados pela formação de clorita, alteração férrica-potássica e propilitica (Santos 2020).

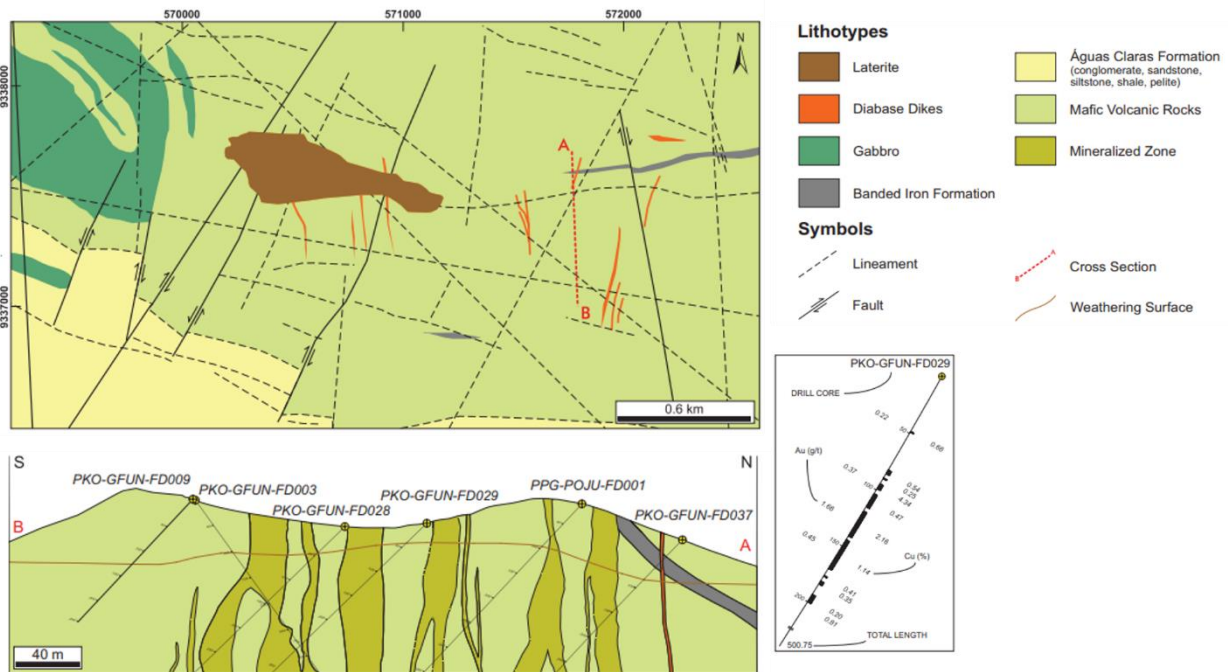


**Figura 4.7:** Perfil dos depósitos AN-34 (A) e QT-02 (B) mostrando as rochas hospedeiras, corpos mineralizados lenticulares e alterações hidrotermais associadas a mineralização (Santos 2020).

As BIF dos depósitos AN-34 e QT-02 apresentam granulação fina a média, faixas/bandas milimétricas (< 1 mm) com intercalação de magnetita reliquiar e zonas de alteração hidrotermal pervasivas com grunerita e granada que aproveitam estrutura primária. Porções dobradas (Figura 4.6C), fraturadas e brechadas, e zonas em padrão stockwork são comuns (Figura 4.6D), assim como veios e vênulas preenchidas por carbonato (Santos *et al.* 2019).

#### 4.1.2.3 Grotta Funda

Situado dentro da zona de cisalhamento Pojuca, e interceptado por falhas subsidiárias do sistema Carajás, o depósito Grotta Funda engloba sequência metavulcanossedimentar pertencente a Formação Salobo-Pojuca, ao qual os derrames basálticos e diabásio são as principais rochas hospedeiras da mineralização de Cu-Au. Gabro, rochas subvulcânicas félsicas e BIF ocorrem de forma subordinada (Hunger *et al.* 2019). O principal sistema hidrotermal compreende metassomatismo cálcico-férrico (albita-hastingsita-escapolita), férrico (magnetita-grunerita almandina), em que ocorre temporalmente associado aos estágios de mineralização (calcopirita-magnetita-esfalerita-pirrotita), seguido de alteração hidrotermal potássica (biotita, clorita-quartzo-turmalina) e encerrando com veios e vênulas tardias preenchidas por quartzo-carbonato (Hunger *et al.* 2019).



**Figura 4.8:** Mapa geológico simplificado e perfil do depósito Grotta Funda apresentando as principais rochas hospedeiras e distribuição espacial das zonas mineralizadas (Hunger *et al.* 2019).

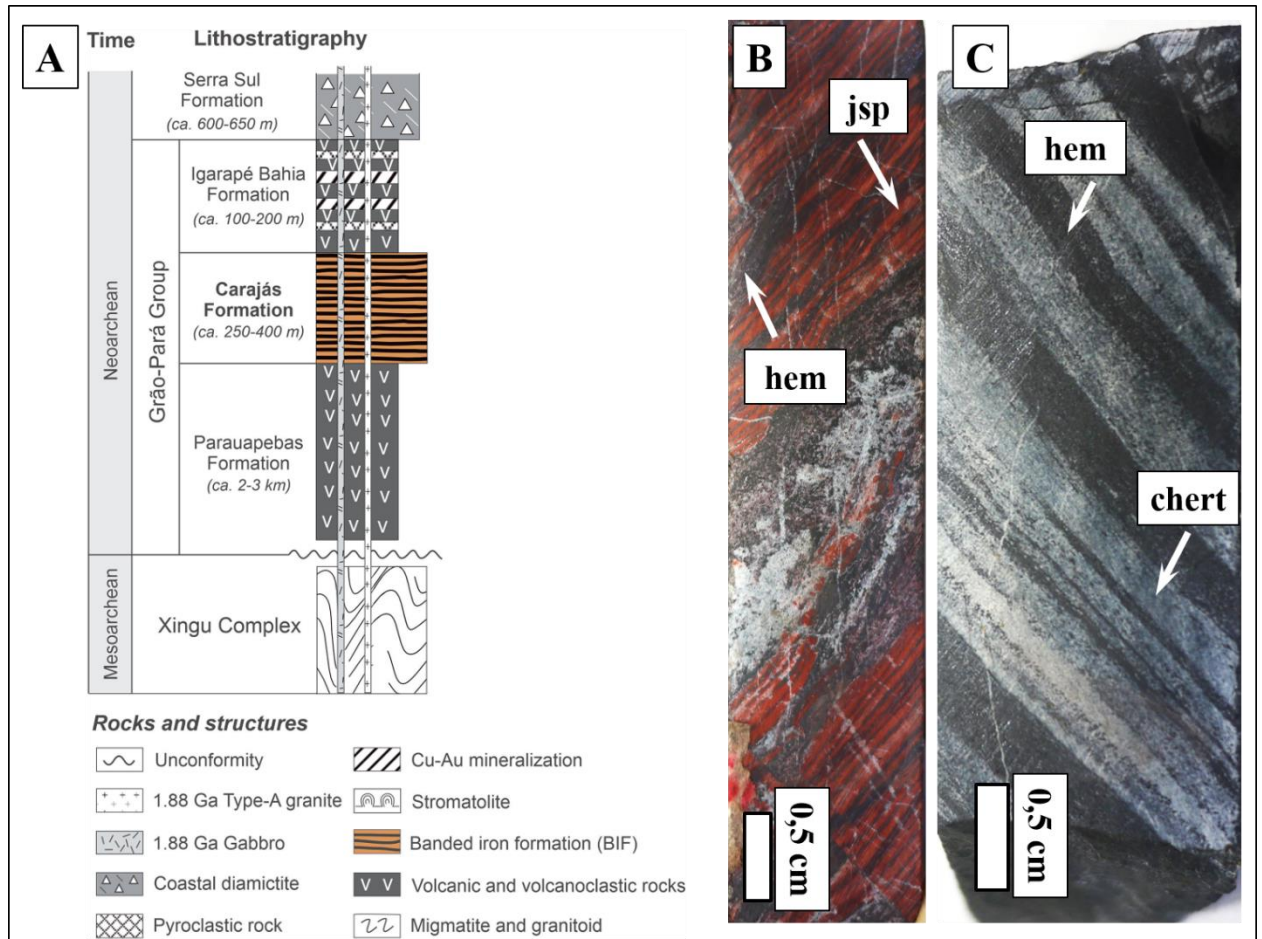
As BIF do depósito Grotta Funda possuem estratificação composicional marcada pela intercalação de quartzo de cor amarelo acinzentado (sílex) e microbandas pretas e opacas (~ 1 mm) ricas em óxidos de ferro (magnetita). Os contatos entre as bandas são em sua maioria difusos (Figura 4.6E), embora em algumas porções sejam nítidos e bem definidos.

#### 4.1.3 Formações ferríferas bandadas da Formação Carajás

A Formação Carajás corresponde a unidade intermediária do Grupo Grão Pará, sequência vulcanossedimentar dominante da Bacia de Carajás (Araújo Filho *et al.* 2020). Compreende camadas e



lentes descontínuas de BIF intrudidas por soleiras e diques máficos (Figura 4.9A; Macambira 2003). As BIF da Formação Carajás estão expostas principalmente nas Serras Norte e Sul, aos quais hospedam importantes depósitos de ferro, cuja mineralização é considerada hipógena (Lindenmayer *et al.* 2001).



**Figura 4.9:** (A) Estratigrafia da parte basal da Bacia de Carajás destacando a Formação Carajás (modificado por Martins *et al.* 2022 de Araújo e Nogueira 2019 e Araújo Filho *et al.* 2020). As BIF típicas da Formação Carajás, Serra Norte: (B) Intercalação entre jaspe e hematita com estrutura primária preservada. (C) Domínio de chert em relação a bandas escuras dominadas por hematita. Jsp: jaspe, hem: hematita.

O minério de ferro da Serra Norte ocorre em jaspilitos bandados, maciços e/ou brechados ao longo do contato com basaltos alterados hidrotermalmente (Silva *et al.* 2013). Três episódios principais podem ser destacados: (1) porção distal dos corpos mineralizados caracterizada pela recristalização do jaspe, formação de magnetita ( $\pm$  martita) e veios de quartzo-carbonato-sulfeto; (2) principal evento de formação de minério de ferro, acompanhada pelo desenvolvimento de veios de martita, quartzo-hematita e hematita-quartzo e dissolução de carbonato; e (3) zona de alteração hidrotermal proximal, com distintos tipos de minérios de hematita (Silva *et al.* 2013).

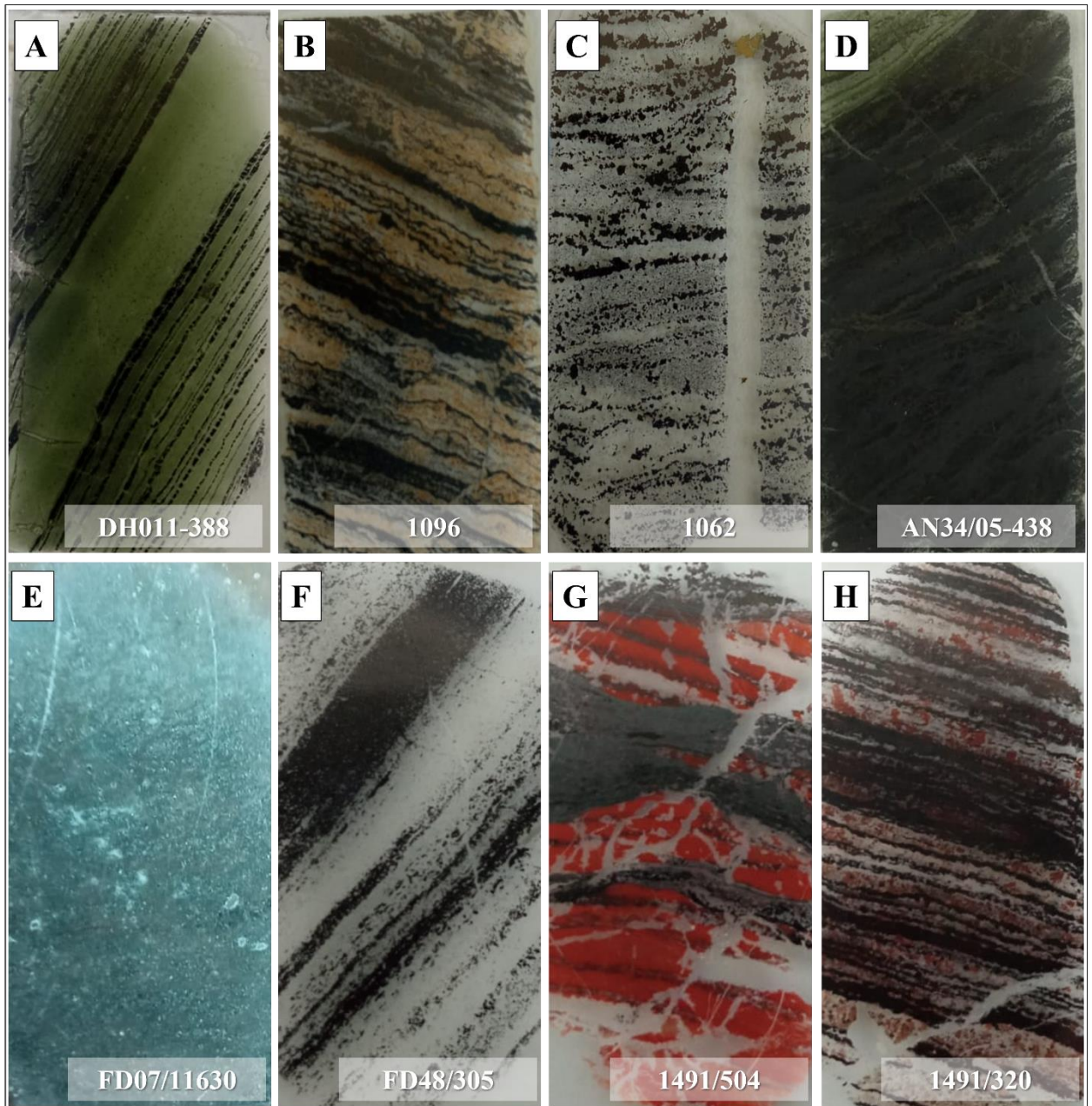
As alterações hidrotermais transformam o jaspilito em minério de ferro de alto teor. Esta transformação é definida principalmente por uma sequência paragenética distinta de minerais de óxido

de ferro com remoção concomitante da sílica, introdução de carbonato e formação de veios que podem conter quartzo, carbonato (calcita e dolomita), hematita, sulfetos (calcopirita e pirita), monazita e ouro (raro) como resultado das variações na sequência paragenética e tipos de veios-brechas, sendo cada depósito da Serra Norte um estágio específico destas alterações (Silva *et al.* 2013).

As BIF da Serra Norte são rochas com faixas intercaladas entre jaspe (sílex vermelho) e chert (e/ou carbonato) com óxido de ferro opaco (principalmente hematita), e podem estar fortemente intemperizadas (Macambira 2003; Silva *et al.* 2009; Ramos 2012). Apresentam poucas variações na cor, espessura e composição do bandamento (Figura 4.9; Ramos 2012).

## **4.2 PETROGRAFIA MICROSCÓPICA DAS BIF**

Esta seção apresentará as características micrográficas das BIF do Grupo Igarapé Bahia e das formações Salobo-Pojuca e Carajás (Figura 4.10), com destaque para os aspectos dos principais minerais de minério presentes e da paragénese hidrotermal superposta a estas rochas.



**Figura 4.10:** Lâminas petrográficas estudadas do Grupo Igarapé Bahia em (A) e das Formações Salobo-Pojuca (B-E) e Carajás (F-H).

#### 4.2.1 Grupo Igarapé Bahia

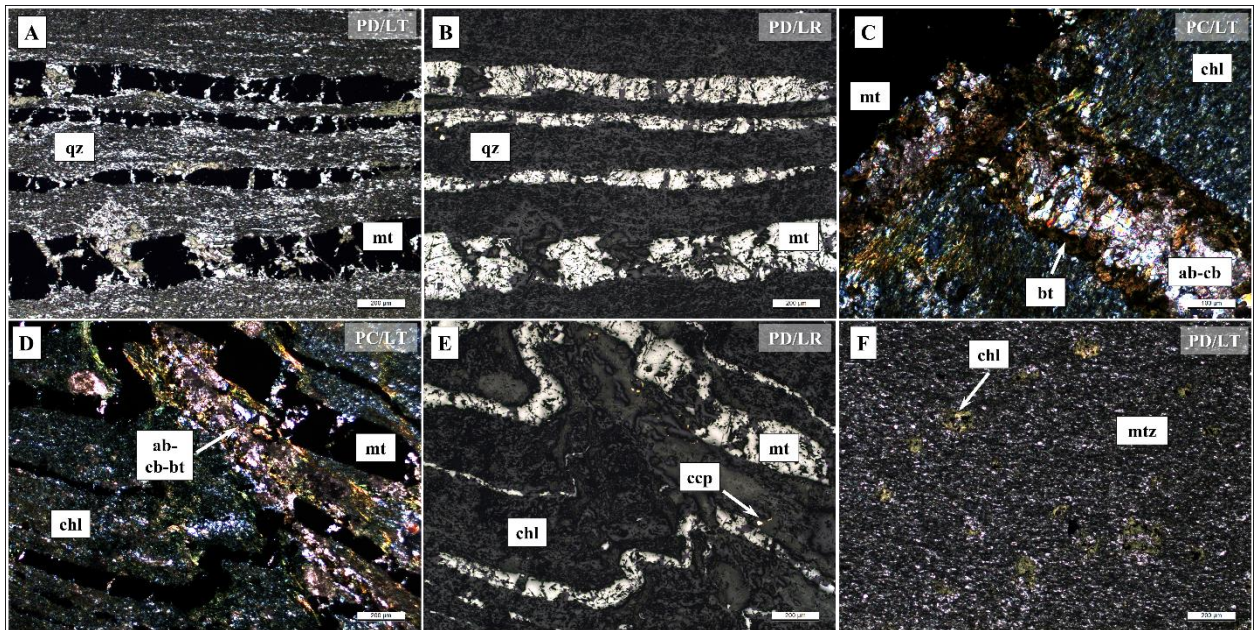
As faixas de óxido de ferro das BIF são contínuas, pouco espessas e essencialmente compostas por magnetita maciça (Figura 4.11A; **Tabela 4.1**). O chert, fase que ocorre intercalada, forma agregados microcristalinos alongados segundo foliação preferencial, que por vezes definem finas faixas irregulares (Figura 4.11B). A cloritização é a principal alteração hidrotermal e ocorre de forma pervasiva com cristais de clorita aciculares (Figura 4.11C), pouco desenvolvidos ao qual definem foliação incipiente.

As cores de interferência pouco anômalas (tonalidade castanha) sugerem composição predominante magnesiânica para esse mineral.

**Tabela 4.1:** Características descritivas e comparações entre as BIF.

<b>Unidade Geológica</b>	<b>Depósito</b>	<b>Características Petrográficas</b>
Grupo Igarapé Bahia	Igarapé Bahia	Estruturas primárias bem preservadas; magnetita como principal óxido de Fe; cloritização como principal alteração hidrotermal; presença de dobras e falhas; metamorfismo raro ou ausente.
Formação Salobo-Pojuca	QT-02	Martitização pervasiva (exceto GT-46); registro de recristalização de quartzo; actinolita é a principal fase da alteração hidrotermal; vênulas tardias de carbonato; metamorfismo raro ou ausente.
	GT-46	
	Grota Funda	
	AN-34	
Formação Carajás	Serra Norte	Martitização pervasiva; microbandas deformadas; chert com inclusões de hematita; carbonatação pervasiva; brechas são locais; presença de calcopirita e pirita.

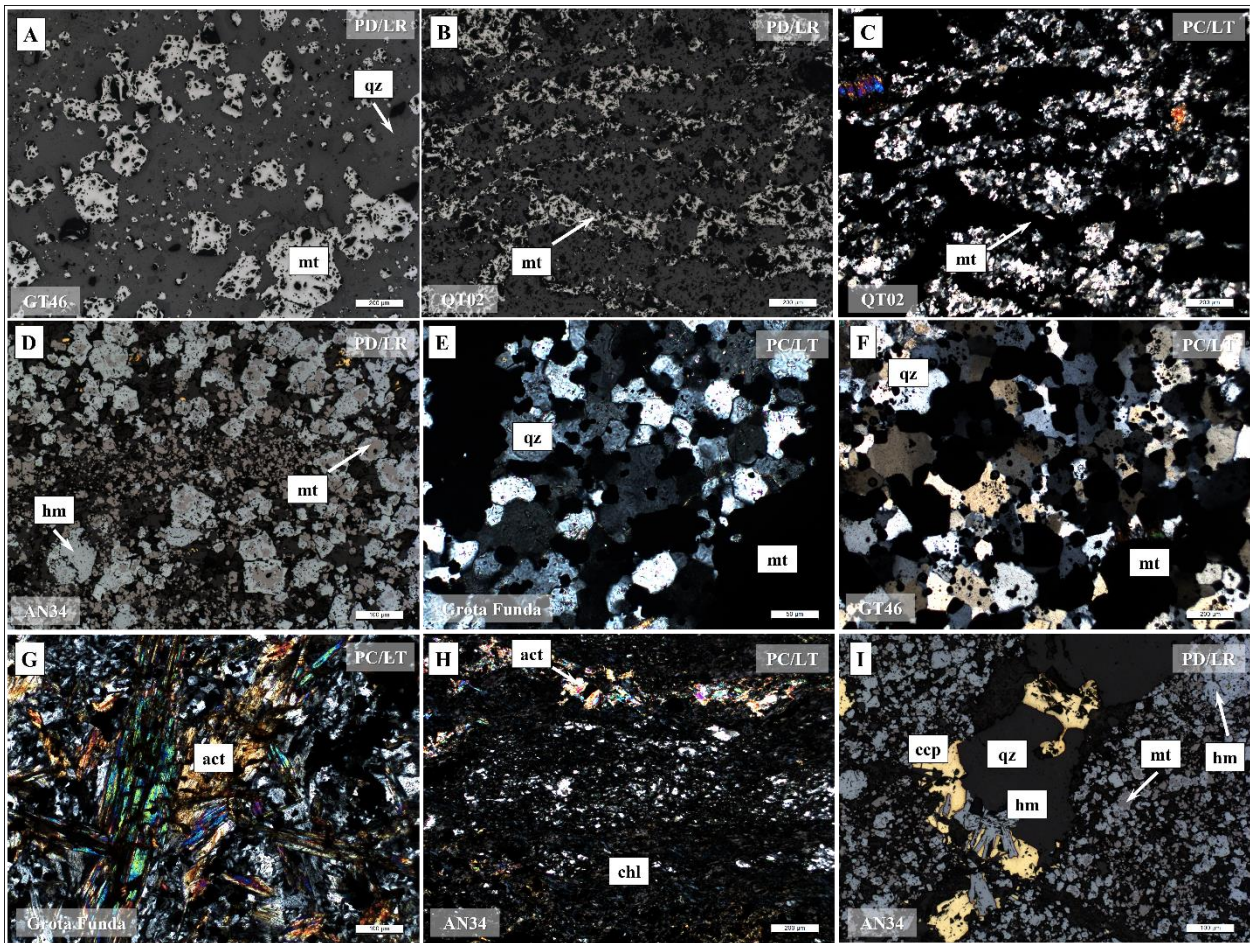
Sistema de fraturas tardias preenchidas por albita-carbonato-biotita-(quartzo-calcopirita-escapolita) são comuns e controlam localmente a ruptura de microbandas, as quais encontram-se dobradas localmente (Figura 4.11D, E). Intervalo de aproximadamente 1 cm de espessura mostra agregados finos com fases minerais similares aos presentes nas vênulas em meio a matriz análoga a BIF com quartzo e clorita (Figura 4.11F).



**Figura 4.11:** Fotomicrografias da BIF do Grupo Igarapé Bahia, depósito Igarapé Bahia (DH011-388). (A, B) Bandas contínuas ricas em magnetita maciça sem alteração intercalada com níveis de quartzo microcristalino. (C) Alteração pervasiva com clorita magnésiana substituindo zonas com quartzo a qual é sobreposta por sistema de vênulas tardio com albita-carbonato no centro e cristais finos e subédricos de biotita nas bordas. (D, E) Microbandas de magnetita dobradas e fraturadas por vênulas tardias com albita-carbonato-biotita. (F) Intervalo sem deformação, matriz criptocristalina e agregados de clorita. PC: polarizadores cruzados, PD: polarizadores descruzados, LT: luz transmitida, LR: luz refletida, qz: quartzo, mt: magnetita, chl: clorita, ab: albita, cb: carbonato, bt: biotita, ccp: calcopirita, mtz: matriz.

#### 4.2.2 Formação Salobo-Pojuca

A magnetita é a principal fase de óxido de ferro das BIF e define intervalos intercalados com quartzo de forma descontínua (Tabela 4.1). Consiste em cristais predominantemente euédricos de granulação grossa (Figura 4.12A, B, C), aos quais ocorrem disseminados ou formam agregados maciços, com ou sem contatos poligonais, embora textura reliquiar também seja comum (Figura 4.12D). Tal característica é reflexo do evidente estágio de alteração pervasivo para hematita a partir das bordas e fraturas presentes nos cristais de magnetita, resultando no desenvolvimento de hematita euédrica com hábito tabular fino e substituição pseudomórfica (martitização). Os cristais de quartzo são finos, deformados e apresentam migração dos limites das bordas, evidenciando bulging localmente ocorre também textura poligonal na qual os grãos se encontram em junções tríplices e extinção ondulante (Figura 4.12C). Tais características também são comuns em geração de textura grossa (Figura 4.12E, F). Actinolita representa a principal fase de alteração hidrotermal (Figura 4.12G) e compreende cristais prismáticos, finos, que sobrepõem de forma pervasiva os intervalos com quartzo. Biotita e muscovita finas ocorrem de maneira subordinada.

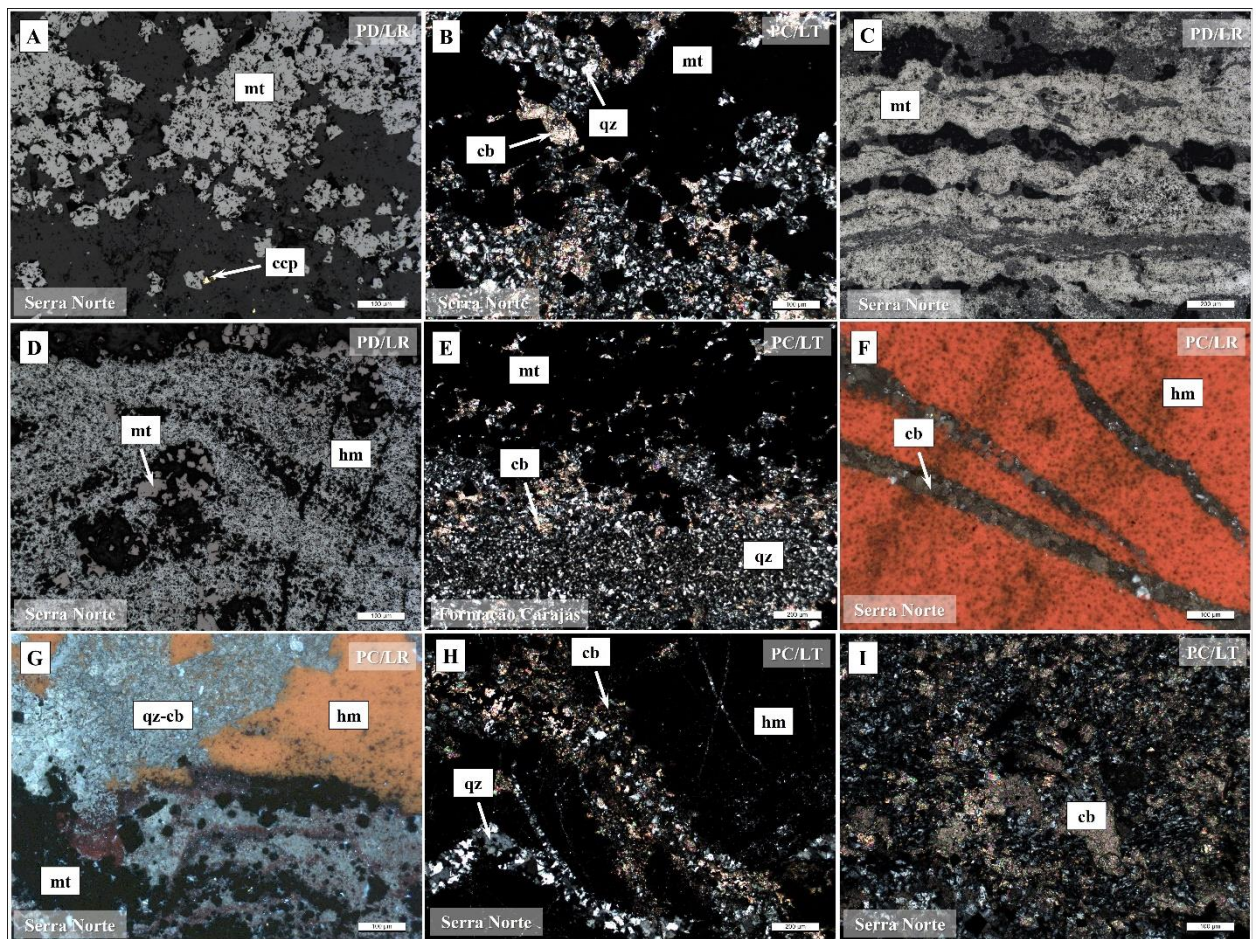


**Figura 4.12:** Fotomicrografias da BIF do Grupo Salobo-Pojuca. (A) Cristais subédricos e grossos de magnetita intercalados de forma descontínua com zonas rica em quartzo (1062). (B, C) Intervalos finos e descontínuos de magnetita maciça entre bandas de quartzo recrystalizado, deformado com evidências de migração dos limites das bordas dos cristais e *bulging* (FD07/11630). (D) Textura reliquiar de magnetita grossa sendo substituída de forma seletiva por hematita da borda para o centro dos cristais (AN34/05-438). (E, F) Cristais grossos de quartzo em contato poligonal, sem foliação evidente dispostos entre cristais grossos de magnetita que definem intervalos pouco espessos e descontínuos (E: 1096, F: 1062). (G) Domínio da principal zona de alteração hidrotermal marcada pela geração de actinolita grossa, subédrica-euédrica sem foliação ou deformação superimposta (1096). (H) Cloritização pervasiva sobrepondo principalmente intervalos ricos em quartzo (AN34/05-438). (I) Contato entre zona com martitização e vênula mineralizada com calcopirita em associação com hematita euédrica e covelita (AN34/05-438). PC: polarizadores cruzados, PD: polarizadores descruzados, LT: luz transmitida, LR: luz refletida, qz: quartzo, mt: magnetita, hm: hematita, act: actinolita, chl: clorita, ccp: calcopirita.

Níveis com clorita de granulação média (Figura 4.12H), composição férrica, associada a calcopirita ± covelita ± hematita tabular são observados (Figura 4.12I). Ocorre sobrepondo alteração com actinolita de forma pervasiva e está associada ao sistema de vênulas preenchidas por quartzo-muscovita-clorita-epidoto. Sistema de vênulas tardio com carbonato com óxido-hidróxido de ferro também é observado.

### 4.2.3 Formação Carajás

Predominam BIF caracterizadas por faixas de diferentes espessuras compostas por agregados de magnetita euédrica, grossa (Figura 4.13A, B), ao qual podem ser substituídos por hematita pouco desenvolvida (tabela 1). A magnetita por vezes exhibe contato poligonal e as microbandas podem mostrar formas similares a boudins (Figura 4.13C, D), refletindo rotação de cristais reliquias. Ocorrência disseminada de quartzo na forma de calcedônia sem qualquer indício de foliação é observada e ocorre intercalada aos intervalos de óxido de Fe (Figura 4.13E). Assim como, jaspilitos caracterizados por matriz de metachert associada a finas inclusões de hematita responsável pela coloração vermelha (Figura 4.13F, G), ao qual ocorre alternada com cristais de magnetita euédrica comumente alterados para hematita maciça e muito fina.



**Figura 4.13:** Fotomicrografias da BIF da Formação Carajás. (A, B) Magnetita grossa em meio a cristais finos de quartzo formando níveis descontínuos. (C) Intervalo de hematita muito fina em microbandas onduladas intercalada com quartzo muito fino. (D) Agregado de magnetita reliquiar definindo níveis ondulados sendo substituído por hematita. (E) Microbanda espessa de óxido de ferro intercalado com nível de quartzo muito fino sendo sobreposto por carbonato de forma pervasiva. (F, G) Zonas com domínio de hematita representado pela coloração avermelhada sendo interceptada por sistema de vênulas tardias preenchidas por carbonato-quartzo (H) que controlam alteração pervasiva de carbonato (I). Imagens A-D, H-I: 1491/320; E: FD48/305; F-G: 1491/504. PC: polarizadores cruzados, PD: polarizadores descruzados, LT: luz transmitida, LR: luz refletida, qz: quartzo, mt: magnetita, hm: hematita, cb: carbonato.

Sobrepondo os cristais de quartzo muito fino ocorre de forma pervasiva alteração com carbonato (Figura 4.13H), quartzo e óxido-hidróxido de Fe geralmente associada à sistema de vênulas tardias de mesma composição que interceptam a sequência de laminações das BIF, brechando localmente (Figura 4.13I). Calcopirita e pirita anédricas são os principais sulfetos de cobre e ocorrem de forma subordinada e intersticial entre a fase de quartzo criptocristalino.



#### 5.1 CARACTERÍSTICAS DESCRITIVAS E COMPARAÇÕES ENTRE AS BIF DE DIFERENTES UNIDADES

As formações ferríferas bandadas do Supergrupo Itacaiúnas, presentes no Grupo Igarapé Bahia e nas formações Salobo-Pojuca e Carajás exibem, no geral, microbandas que tendem a ser contínuas, nítidas, bem definidas, preservadas de metamorfismo, deformação intensa e assembleias minerais que são parcialmente alteradas por eventos hidrotermais posteriores como cloritização, geração de anfibólio e sistema de vênulas tardias que controlam a alteração pervasiva de carbonato, além da comum martitização da magnetita.

A BIF do Grupo Igarapé Bahia tem como principal característica a falta de alteração da magnetita, único óxido de ferro observado. É comum também a típica alteração pervasiva com clorita que substitui zonas ricas em quartzo e é descrita como sendo um metassomatismo extenso. Próximo a zona de cisalhamento regional, a sequência vulcanossedimentar do Grupo Igarapé Bahia encontra-se dobrada, aspecto que também é descrito localmente para as amostras deste estudo (Melo *et al.* 2019). Neste caso, o único depósito IOCG hospedado nesta formação é o depósito Igarapé Bahia, que exibe um padrão de alteração hidrotermal distintos dos demais da porção norte do Domínio Carajás.

Por outro lado, embora a magnetita também seja a principal fase de óxido de ferro da Formação Salobo-Pojuca, e por vezes não apresente alteração superposta (depósito GT46), o processo de martitização é o mais comum, particularmente nos depósitos AN-34 e Grota Funda. Outra geração de hematita pode ser observada e mostra relação com veios e está em associação com sulfetos subordinados, ao qual ocorrem sempre neste contexto. Essas BIF são encontradas na maioria dos depósitos da porção norte do Domínio Carajás (e.g. GT-46, AN-34, QT-02 e Grota Funda) e exibem paragêneses com granada-grunerita-biotita-magnetita.

Enquanto o destaque da BIF da Formação Carajás é a martitização avançada e expressiva, ao qual imprimi coloração avermelhada na sequência ferrífera (depósito Serra Norte), embora níveis com magnetita reliquiar também sejam observados formando aglomerados de cristais lobados em forma de olho (Silva *et al.* 2011). Outra particularidade para esta formação é a alteração hidrotermal com carbonato associado a rede de vênulas mais desenvolvida. Embora seja um evento comum em todas as BIF, nos depósitos da Formação Carajás é mais proeminente a qual substitui de forma quase total os níveis com quartzo muito fino. Tal qualidade é um sinal para intervalos de minério de ferro de alto teor (Silva *et al.* 2013), já que reflete o enriquecimento de óxido de ferro em relação a níveis silicosos, uma

vez que tais intervalos são removidos concomitante a formação de um conjunto específico de veios que podem conter quartzo, carbonato, hematita, sulfeto, monazita e ouro raro (Silva *et al.* 2011). Embora não hospedem nenhum depósito IOCG, algumas ocorrências cupríferas vêm recentemente sendo reportadas nas BIF da Formação Carajás.

## **5.2 AMBIENTES DE PRECIPITAÇÃO DAS BIF**

Uma das grandes questões que permeia a gênese das BIF de Carajás é seu ambiente de formação e o tipo de BIF. Se essas formações ferríferas bandadas são do tipo Algoma ou do tipo Lago Superior é uma dúvida que permanece em aberto. A complexidade litoestratigráfica das formações ferríferas bandadas da Província Carajás com associação com rochas vulcânicas e vulcanoclásticas, e com rochas sedimentares subordinadas, dificulta essa classificação. Por outro lado, as BIF de diferentes grupos e formações podem também representar tanto ambientes e tempo de formação distintos quanto as próprias condições de precipitação no oceano.

Estudos recentes mostram condições anóxicas do oceano durante a precipitação das BIF do Supergrupo Itacaiúnas em 2,74 Ga (Rego *et al.* 2020). Neste mesmo estudo, os autores reconheceram um forte aporte de atividade hidrotermal de assoalho oceânico neste período. Em contrapartida, outros estudos sugerem que houve uma flutuação de condições de oxidação no oceano, o que explicaria as diferentes fácies de BIF encontradas em Carajás (Justo *et al.* 2020). Isso pode ser visto pela alternância de BIF ricas em hematita, ricas em magnetita e jaspilitos (James 1954, Justo *et al.* 2020).

Assim, devido tanto a assinatura geoquímica quanto a grande extensão lateral das BIF de Carajás, Martins *et al.* (2022) consideram que o ambiente de deposição das BIF da Formação de Carajás sejam um ambiente híbrido entre BIF do tipo Algoma e do tipo Lago Superior.

## **5.3 EVIDÊNCIAS DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL E METAMORFISMO NAS BIF**

Assembleias minerais de condições diagenéticas a condições de baixo grau metamórfico incluem principalmente chert, magnetita, hematita, siderita, calcita, dolomita-anquerita, grenalita, stilpnomelano minnesotita, riebeckita, ferro-annita e sulfetos de ferro (Klein 1983). Muitos desses minerais são encontrados em BIF nos depósitos Igarapé Bahia, por exemplo. As paragêneses com granada e grunerita são encontradas sempre associados aos grandes depósitos IOCG da região.

Todas as BIF desses estudos estão contidas em sequências de rochas sedimentares e vulcanosedimentares extremamente preservadas. Basaltos amidgdaloidais são reconhecidos em depósitos como Grota Funda e AN-34/QT-02 e mostram a ausência de metamorfismo (Hunger *et al.*

2019, Santos 2020). A principal amostra de BIF que contém esse tipo de informação é a coletada no campo regional. Essa amostra está fora da escala de depósito e, conseqüentemente, sem evidências de alteração hidrotermal. A assembleia mineral desta rocha consiste em intercalação entre níveis de quartzo e magnetita sem qualquer alteração ou deformação sobreposta. Essa assembleia pode sugerir que fora da escala dos depósitos hidrotermais de cobre, as BIF não apresentam paragêneses com granada, grunerita e biotita.

Por outro lado, algumas BIF mostram texturas e microestruturas de deformação. Quartzo recristalizado exibindo extinção ondulante, limites de grãos irregulares a lobóides e desenvolvimento de *bulging*, além de níveis de magnetita alongada sugerem indícios de metamorfismo e deformação da BIF (depósitos QT-02 e NA-34), atributos já mencionados para este cenário na literatura (depósito GT-46, Toledo *et al.* 2019). Essas evidências, no entanto, podem apenas estar relacionados às zonas de cisalhamento regionais.

Embora as BIF mostrem intervalos hidrotermalizados heterogêneos, assim com a deformação e metamorfismo, a boa preservação é frequente e estas rochas podem fornecer discussões importantes a respeito do contexto genético, deposicional e até mesmo sobre as condições paleoambientais no Arqueano, bem como sobre os eventos superimpostos a estas extensas seqüências.



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

---

Análises mesoscópicas e microscópicas das BIF inseridas no grupo Igarapé Bahia e nas formações Salobo-Pojuca e Carajás sugerem que:

- A assembleia mineral e estruturas primárias são semelhantes, embora eventos hidrotermais posteriores modifiquem de forma heterogênea as características das BIF das diferentes unidades. Sendo que o estágio de carbonatação é o mais comum entre as sequências ferríferas e quando bem desenvolvido parece ter relação com minério de ferro de alto teor (Silva et al 2013);
- O metassomatismo ocorre de forma mais intensa em regiões proximais a zonas de cisalhamento regionais, assim como a geração de estruturas pós-deposicionais das BIF, sendo comum a formação de dobras e falhas;
- As paragêneses com granada-grunerita-biotita-magnetita são reconhecidas apenas em escala de depósito, sendo possivelmente produtos de alteração hidrotermal de alta temperatura. Evidências de deformação, por outro lado, são constantemente reconhecidas nessas rochas;
- O ambiente de precipitação das BIF permanece em aberto devido à complexidade litoestratigráfica das formações ferríferas bandadas da Província Carajás. No entanto, estudos recentes entendem que a assinatura geoquímica das BIF seja um indicativo de um contexto híbrido fazendo com que a classificação das BIF como sendo do tipo Algoma e tipo Lago Superior sejam possíveis.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- 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: SBG, 7º Congresso Latino-Americano de Geologia, Belém, PA. Anais*, 324-333.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N. 1991. Serra dos Carajás, folha SB.22-ZA, Estado do Pará. *In: Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Brasília: CPRM*, 136 p.
- Araújo Filho, R.C., Nogueira, A.C.R., Araújo, R.N. 2020. New stratigraphic proposal of a Paleoproterozoic siliciclastic succession: Implications for the evolution of the Carajás Basin, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. v. 102.
- Avelar V.G., Lafon J. M., Correia Jr., F.C., Macambira, E. M. B. 1999. O Magmatismo arqueano da região de Tucumã-Província Mineral de Carajás: novos resultados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências*. **29(4)**: 453-460
- Barros C.E.M., Macambira M. J.B., Barbey P., Scheller T. 2004. Dados isotópicos Pb–Pb em zircão (evaporação) e Sm–Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: implicações petrológicas e tectônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**: 531–538.
- Bekker A., Slack J.F., Planavsky N., Krapež B., Hofmann A., Konhauser K.O., Rouxel O.J. 2010. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes. *Economic Geology*, **105**: 467-508.
- Dardenne M. A., Schobbenhaus C.S. 2001. *Metalogênese do Brasil*. Ed.UnB/CNPq, Brasília. 392 p.
- Dall'Agnol R., Costi H.T., Leite A.A., Magalhães M.S., Teixeira N.P. 1999. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precambrian Research*, **95**: 9-39.
- DOCEGEO 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. *In: 35º Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, Anais...* p. 11-56.
- Delinardo da Silva M.A. 2014. *Metatexitos e diatexitos do Complexo Xingu na região de Canaã dos Carajás: Implicações para a evolução mesoarqueana do Domínio Carajás, PA*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo 121p. Unpublished.
- Figueiredo e Silva R.C. 2009. *Evolução e gênese do minério de ferro hidrotermal nos depósitos da Serra Norte, Província Mineral de Carajás*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 236p.

Petarli, G.E. 2024. Caracterização petrográfica das formações ferríferas...

Figueiredo e Silva, R.C. *et al.* 2013. Hydrothermal fluid process and evolution of the Giant Serra Norte jaspilite-hosted iron ore deposits, Carajás Mineral Province, Brazil. *Society of Economic Geologists. In: Economic Geology*, **108**: 739-779.

Figueiredo e Silva, R.C. *et al.* 2020. Geotectonic signature and hydrothermal alteration of metabasalts under and overlying the giant Serra Norte iron deposits, Carajás mineral Province. *Ore Geology Reviews*, v. 120.

Hagemann, S.H., Rosière, C. A., Lobato, L. F., Baars, Zucchetti, M. R. C., Figueiredo e Silva. 2006. Controversy in genetic models for Proterozoic high-grade, banded iron formation (BIF)-related iron deposits – unifying or discrete model(s)?. *Applied Earth Science*, **115 (4)**: 147-151.

Huhn S.R.B., Macambira M.J.B., Dall'Agnol R. 1999. Geologia e geocronologia Pb/Pb do granito alcalino Arqueano Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás - PA. *In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, Manaus, Resumos Expandidos*, **(6)**: 463-466.

Ibanez, K. Minério de cobre: Importância, tipos de depósitos e curiosidades. Igeológico. 2022. Disponível em: <https://igeologico.com.br/minerio-de-cobre-importancia-tipos-de-depositos-e-curiosidades/>. Acesso em: 05 jun. 2022.

Klein, C. 2005. Some Precambrian Banded Iron-Formations (BIFs) from Around the World: Their Age, Geologic Setting, Mineralogy, Metamorphism, Geochemistry, and Origins. *American Mineralogist*, **90**: 1473-1499.

Kuchenbecker M., Pedrosa-Soares A.C., Babinski M., Fanning M. 2015. Detrital zircon age patterns and provenance assessment for pre-glacial to post-glacial successions of the Neoproterozoic Macaúbas Group, Araçuaí orogen, Brazil. *Precambrian Research*. **266**: 12-26.

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.

Lancaster Oliveira, J., Fanton, J., Almeida, A.J., Leveille, R.A., Vieira, S. 2000. Discovery and geology of the Sossego copper-gold deposit, Carajás district, Pará State, Brazil. *In: International Geological Congress, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia*, 31. Abstract volume.

Lobato L.M., Rosière C.A., Figueiredo e Silva R.C., Zucchetti M., Baars F.J., Seoane J.C.S., Rios F.J., Pimentel M., Mendes G.E., Monteiro A.M. 2005. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás - controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da Província. *In: Marini J.O., Queiróz E.T., Ramos W.B. (eds.) - Caracterização de distritos mineiros da Amazônia. DNPM-CT-Mineral-ADIMB*, p. 25-92.

Macambira E.M.B., Schrank A. 2002. Químio estratigrafia e evolução dos jaspilitos da Formação Carajás (PA). *Revista Brasileira de Geociências*. **32**: 567-578.



- Machado, N., Lindenmayer, D.H., Krough TE, Lindenmayer, Z.G. 1991. U–Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás Area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*. **39 (3-4)**: 329-354.
- Meireles E.M. 1986. *Geoquímica e petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás, PA*. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, 150p. Unpublished.
- Melo G.H.C., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Santiago E.E.B. 2016. Temporal evolution of the giant Salobo IOCG deposit, Carajás Province (Brazil): constraints from paragenesis of hydrothermal alteration and U-Pb geochronology. *Mineralium Deposita*, **52(5)**: 709-732.
- Melo, G.H.C., 2018. *Evolução temporal e fonte de fluidos dos depósitos IOCG Salobo e Igarapé Bahia, Província Carajás*; 2018. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UNICAMP, 219p.
- Melo, G.H.C. et al. 2021. Magmatic-hydrothermal fluids leaching older seafloor exhalative rocks to form the IOCG deposits of the Carajás Province, Brazil: evidence from boron isotopes. *Precambrian Research*. v. 365.
- Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Hitzman M.W., Carvalho E.R., Johnson C.A., Souza Filho C.R., Torresi I. 2008. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide copper gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, **43**: 129-159.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Creaser R.A., Dufrane S. A., Tassinari C.C.G., Sato K., Kemp A.I.S., Amaral W.S. 2015a. Neoproterozoic and Paleoproterozoic Iron Oxide-Copper-Gold Events at the Sossego Deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb Geochronological Evidence. *Economic Geology*. **110**: 809-835.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Creaser R.A., Dufrane S. A., Melo G.H.C., Delinardo da Silva M.A., Tassinari C.C.G., Sato K. 2015b. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*. **50**: 517-546.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W., Pinheiro R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. *Bol. Mus. Par. Em. Goeldi*, **7**: 177-277.
- Pidgeon R.T., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. Th–U–Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chemical Geology* **166**: 159–171.
- Pinheiro R.V., Kadekaru K., Soares, A. V. Freitas C., Ferreira S.N., Matos, F.M.V. 2013. Carajás, Brasil - Uma breve revisão tectônica. Anais do 13º Simpósio de Geologia da Amazônia Belém.

Petarli, G.E. 2024. Caracterização petrográfica das formações ferríferas...

Ramos, J.N. 2012. *Caracterização de feições sedimentares nos jaspilitos da Formação Carajás*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geologia), Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 91 f.

Rigon J.C., Munaro P., Santos L.A., Nascimento J.A.S., Barreira C.F. 2000. Alvo 118 copper–gold deposit: geology and mineralization, Serra dos Carajás, Pará, Brazil. *In: 31st International Geological Congress, Volume de Resumos*, v. 31.

Santos, B.C.S. dos et al. 2019. Rochas hospedeiras, padrões de alteração hidrotermal e estilos de mineralização nos depósitos IOCG AN-34 e QT-02, porção norte da Província Carajás. *In: Anais do XVI Simposio de Geologia da Amazônia*. Manaus, AM, CCPA.

Silva G.G., Lima M.I.C., Andrade A.R.F., Issler R.S., Guimarães G. 1974. Geologia. *In: Levantamento de recursos naturais. Projeto Rodam: Folha SB.22 Araguaia e pane da Folha SC.22 Tocantins*. Rio de Janeiro, *MME-DNPM*. **4**: 143.

Tallarico, F.H.B., Figueiredo B.R., Groves D.I., Kositcin N., McNaughton N.J., Fletcher I.R., e Rego J.L. 2005. Geology and SHRIMP U–Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper–gold belt, Brazil: an Archean (2.57 Ga) example of iron–oxide Cu–Au–(U–REE) mineralization. *Economic Geology*. **100**:7–28.

Tavares F.M. 2015. *Evolução geotectônica do nordeste da Província Carajás*. PhD. Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 131p. Unpublished.

Tazava, E. 1999. *Mineralização de Au-Cu-(±Etr-U) associada às brechas hidrotermais do Depósito de Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás, PA*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 107 p.

Teixeira J.B.G. 1994. *Geochemistry, petrology, and tectonic setting of archaean basaltic and dioritic rocks from the N4 Iron deposit, Serra dos Carajás, Pará, Brazil*. Ph.D. Thesis. Department of Geosciences, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 161 p.

Teixeira N.A., Matos F.M.V., Ganade C.E., Klein E.L., Dreher A.M., Tavares F.M., Campos L.D., Porto F. 2015. Carajás and Tapajós Mineral Provinces: Cratonic and Pericratonic Lithosphere Keel Metallogeny. *In: Simp. de Geol. da Amaz., 14, Marabá, SBG. Resumos Expandidos*. Marabá, PA.

Trendall A.F. 1983. Introduction. *In: A.F. Trendall and R.C. Morris (eds). Iron-formation facts and problems*. Amsterdam. *Elsevier*, **6**: 1-12.

Trendal, A. F. Basei M. A. S., Laeter J. R., Nelson D. R. 1998. Ion microprobe zircon U-Pb results from the Carajás área of the Amazon Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, **11**: 165-277.

Vale. 2012. Vale obtains operation license for Salobo. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/en/investors/information-market/press-releases/pages/licenca-salobo.aspx>. Acesso em 06 de junho de 2022.

Vasquez, L.V., Rosa-Costa, L.R., Silva, C.G., Ricci, P.F., Barbosa, J.O., Klein, E.L., Lopes, E.S., Macambira, E.B., Chaves, C.L., Carvalho, J.M., Oliveira, J.G., Anjos, G.C., Silva, H.R. 2008. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas—SIG: Texto explicativo dos Mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará, 1:1.000.000*. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Belém. Escala 1:1.000.000.

Zuchetti M. 2007. *Rochas máficas do grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 E N5, Carajás, PA*. PhD. Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 165p. Unpublished.



## APÊNDICE

**Quadro 1:** Descrição das lâminas delgadas.

Nome da Lâmina	Cor	Dureza	Refletividade	Hábito	Clivagem	Birreflectância	Anisotropia	Pleocroísmo	Textura	Nome do Material	Proporção
DH 011/388	CINZA	Alta	Baixo	Granular	Sim	Não	Isotrópico	Não	Granular	Magnetita	12%
DH 011/388	CINZA	Média	Baixo	Maciço	Não	Sim	Anisotrópico	Sim	Granular	Esfalerita	7%
DH 011/388	CINZA	Alta	Alto	Granular	Sim	Não	Isotrópico	Não	Lamelar	Hematita	12%
DH 011/388	ROSA	Média	Baixo	Maciço	Sim	Não	Isotrópico	Não	Simplectítica	Bornita	4%
DH 011/388	AZUL	Baixa	Baixo	Lamelar	Sim	Sim	Anisotrópico	Sim	Lamelar	Covelita	2%
DH 011/388	AMARELO	Alta	Alto	Granular	Não	Sim	Isotrópico	Não	Granular	Pirita	7%
DH 011/388	AMARELO	Média	Alto	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Poiquilitica	Calcopirita	3%
DH 011/388	GANGA	Média	Moderado	-	-	Não	Isotrópico	Não	-	Ganga	53%
Nome da Lâmina	Cor	Dureza	Refletividade	Hábito	Clivagem	Birreflectância	Anisotropia	Pleocroísmo	Textura	Nome do Material	Proporção
1096	CINZA	Média	Baixo	Granular	Não	Sim	Anisotrópico	Sim	Poiquilitica	Esfalerita	6%
1096	AMARELO	Média	Moderado	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Lamelar	Calcopirita	15%
1096	AMARELO	Média	Moderado	Granular	Não	Não	Isotrópico	Não	Simplectítica	Calcocita	5%
1096	AZUL	Baixa	Baixo	Lamelar	Sim	Sim	Anisotrópico	Sim	Lamelar	Covelita	1%
1096	GANGA	Média	Moderado	-	-	Não	Isotrópico	Não	-	Ganga	73%

Nome da Lâmina	Cor	Dureza	Refletividade	Hábito	Clivagem	Birreflectância	Anisotropia	Pleocroísmo	Textura	Nome do Material	Proporção
1062	AMARELO	Alta	Alto	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Granular	Calcopirita	12%
1062	AMARELO	Alta	Alto	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Granular	Calcocita	
1062	LARANJA	Baixa	Alto	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Maciço	Cobre	1%
1062	CINZA	Alta	Moderado	Granular	Sim	Não	Isotrópico	Não	Granular	Galena	5%
1062	CINZA	Baixa	Baixo	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Lamelar	Covelita	27%
1062	CINZA	Alta	Moderado	Maciço	Não	Sim	Anisotrópico	Sim	Granular	Esfalerita	5%
1062	GANGA	Média	Moderado	-	-	Não	Isotrópico	Não	-	Ganga	50%
Nome da Lâmina	Cor	Dureza	Refletividade	Hábito	Clivagem	Birreflectância	Anisotropia	Pleocroísmo	Textura	Nome do Material	Proporção
FD 07/11630	AMARELO	Alta	Alto	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	-	Calcopirita	10%
FD 07/11630	CINZA	Alta	Moderado	Maciço	Não	Sim	Anisotrópico	Sim	-	Esfalerita	7%
FD 07/11630	CINZA	Baixa	Baixo	Octaédrico	Sim	Não	Isotrópico	Não	-	Galena	2%
FD 07/11630	GANGA	Média	Moderado			Não	Isotrópico	Não	-	Ganga	81%
Nome da Lâmina	Cor	Dureza	Refletividade	Hábito	Clivagem	Birreflectância	Anisotropia	Pleocroísmo	Textura	Nome do Material	Proporção
AN 34/05-438	AZUL	Baixa	Baixo	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Lamelar	Covelita	7%
AN 34/05-438	ROSA	Média	Baixo	Maciço	Sim	Não	Isotrópico	Não	Simplectítica	Bornita	21%
AN 34/05-438	GANGA	Média	Moderado	-	-	Não	Isotrópico	Não	-	Ganga	72%
Nome da Lâmina	Cor	Dureza	Refletividade	Hábito	Clivagem	Birreflectância	Anisotropia	Pleocroísmo	Textura	Nome do Material	Proporção
PG 6501	AZUL	Baixa	Baixo	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Lamelar	Covelita	2%
PG 6501	AMARELO	Alta	Alto	Granular	Não	Não	Isotrópico	Não	Lamelar	Calcopirita	7%
PG 6501	GANGA	Média	Moderado	-	-	Não	Isotrópico	Não	-	Ganga	91%

Nome da Lâmina	Cor	Dureza	Refletividade	Hábito	Clivagem	Birreflectância	Anisotropia	Pleocroísmo	Textura	Nome do Material	Proporção
1491/520	CINZA	Alta	Média	Lamelar	Não	Não	Anisotrópico	Sim	Simplectítica	Ilmenita	7%
1491/520	AMARELO	Alta	Muito Alto	Granular	Não	Sim	Anisotrópico	Sim	Lamelar	Pirrotita	14%
1491/520	CINZA	Alta	Baixo	Granular	Sim	Não	Isotrópico	Não	Granular	Magnetita	2%
1491/520	CINZA	Alta	Alto	Granular	Sim	Não	Isotrópico	Não	Lamelar	Hematita	17%
1491/520	VERMELHO	Média	Baixo	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Lamelar	Martita	12%
1491/520	GANGA	Média	Moderado	-	--	Não	Isotrópico	Não	-	Ganga	48%
Nome da Lâmina	Cor	Dureza	Refletividade	Hábito	Clivagem	Birreflectância	Anisotropia	Pleocroísmo	Textura	Nome do Material	Proporção
FD 48/305	AMARELO	Alta	Muito Alto	Granular	Não	Sim	Anisotrópico	Sim	Lamelar	Pirrotita	10%
FD 48/305	CINZA	Alta	Média	Lamelar	Não	Não	Anisotrópico	Sim	Simplectítica	Ilmenita	5%
FD 48/305	CINZA	Alta	Baixo	Granular	Sim	Não	Isotrópico	Não	Granular	Magnetita	1%
FD 48/305	CINZA	Alta	Alto	Granular	Sim	Não	Isotrópico	Não	Botoidal	Hematita	24%
FD 48/305	AMARELO	Média	Alta	Granular	Não	Não	Isotrópico	Não	Granular	Arsenopiritita	2%
FD 48/305	GANGA	Média	Moderado			Não	Isotrópico	Não		Ganga	48%
Nome da Lâmina	Cor	Dureza	Refletividade	Hábito	Clivagem	Birreflectância	Anisotropia	Pleocroísmo	Textura	Nome do Material	Proporção
1491/504	AMARELO	Alta	Muito Alto	Granular	Não	Sim	Anisotrópico	Sim	Lamelar	Pirrotita	17%
1491/504	CINZA	Alta	Baixo	Granular	Sim	Não	Isotrópico	Não	Granular	Magnetita	3%
1491/504	CINZA	Alta	Alto	Granular	Sim	Não	Isotrópico	Não	Especularitica	Hematita	17%
1491/504	VERMELHO	Média	Baixo	Maciço	Não	Não	Isotrópico	Não	Lamelar	Martita	15%
1491/504	GANGA	Média	Moderado			Não	Isotrópico	Não		Ganga	48%





**Quadro 2:** Observações quanto a descrição das lâminas delgadas.

<b>Nome da Lâmina</b>	<b>Nome do Material</b>	<b>Observação</b>
DH 011/388	Esfalerita	A Esfalerita está bordeando a bornita.
DH 011/388	Hematita	Lamelar e bandada.
DH 011/388	Covelita	A covelita está dentro da calcopirita.
DH 011/388	Pirita	Grãos isolados dentro da banda de hematita.
DH 011/388	Calcopirita	Na borda do grão de pirita.
DH 011/388	Ganga	Ganga
<b>Nome da Lâmina</b>	<b>Nome do Material</b>	<b>Observação</b>
1096	Esfalerita	Inclusa na calcopirita.
1096	Calcocita	Borda da calcopirita
1096	Covelita	Borda entre grãos de calcopirita
<b>Nome da Lâmina</b>	<b>Nome do Material</b>	<b>Observação</b>
AN 34/05-438	Covelita	Covelita na borda da bornita
AN 34/05-438	Bornita	Bornita granular
<b>Nome da Lâmina</b>	<b>Nome do Material</b>	<b>Observação</b>
1491/520	Ilmenita	Aparentar estar dentro da pirrotita
<b>Nome da Lâmina</b>	<b>Nome do Material</b>	<b>Observação</b>
FD 48/305	Ilmenita	Aparentar estar dentro da pirrotita
FD 48/305	Magnetita	Aparentar estar dentro da hematita