



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Ciências Exatas e da Terra
Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PETROGRAFIA E LITOQUÍMICA DE ROCHAS
FERRÍFERAS NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DO
RIO GRANDE DO NORTE (DOMÍNIO RIO PIRANHAS -
SERIDÓ, NE DA PROVÍNCIA BORBOREMA)**

Autor:

ALEXANDRE RANIER DANTAS

Orientador:

Dr. MARCOS ANTÔNIO LEITE DO NASCIMENTO

Dissertação n.º 186/PPGG.

Natal-RN, Fevereiro de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PETROGRAFIA E LITOQUÍMICA DE ROCHAS
FERRÍFERAS NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DO
RIO GRANDE DO NORTE (DOMÍNIO RIO PIRANHAS -
SERIDÓ, NE DA PROVÍNCIA BORBOREMA)**

Autor:

ALEXANDRE RANIER DANTAS

Dissertação apresentada em 10 de fevereiro de dois mil e dezessete, ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN como requisito à obtenção do Título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica, com área de concentração em Geodinâmica.

Comissão Examinadora:

Dr. Marcos Antônio Leite do Nascimento (orientador)

Dr. Vladimir Cruz de Medeiros

Dra. Raquel Franco de Souza

Natal-RN, Fevereiro de 2017.

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / SISBI / Biblioteca Setorial
Centro de Ciências Exatas e da Terra – CCET.

Dantas, Alexandre Ranier.

Petrografia e litoquímica de rochas ferríferas na região central do Estado do Rio Grande do Norte (Domínio Rio Piranhas – Seridó, NE da Província Borborema) / Alexandre Ranier Dantas. - Natal, 2017.

169f.: il.

Orientador: Dr. Marcos Antônio Leite do Nascimento.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica.

1. Formações ferríferas. 2. Petrografia. 3. Litoquímica. 4. Faixa Seridó. I. Nascimento, Marcos Antônio Leite do. II. Título.

RN/UF/BSE-CCET

CDU: 553.31

RESUMO

As ocorrências de rochas ferríferas na região central do Rio Grande do Norte correspondem essencialmente a pequenos depósitos que aparentemente não apresentam potencial econômico. Em contrapartida, nos últimos anos, pequenos jazimentos desse bem mineral tem sido explorados em algumas áreas do Estado, especialmente os inseridos na região do Domínio Rio Piranhas-Seridó. As formações ferríferas ocorrem como intercalações decimétricas a algumas dezenas de metros em gnaisses da Formação Jucurutu, na base da sequência metavulcanossedimentar do Grupo Seridó. Menos frequentemente estão associadas às rochas metamáficas encaixadas em gnaisses do Complexo Caicó. Mapeamentos sistemáticos na escala de 1:100.000 (folhas Lajes e Currais Novos) e levantamento de recursos minerais executados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais identificaram uma quantidade significativa de ocorrências minerais (cadastro de 48 ocorrências de rochas ferríferas). Neste trabalho será realizado uma caracterização petrográfica macro e microscópica de lâminas delgadas e seções bipolidas e polidas de rochas ferríferas, além da discussão dos dados de litoquímica, através da análise dos elementos maiores, assinatura dos elementos traços e terras raras para definição de protólitos e ambiente tectônico, quando for o caso, bem como o uso de MEV-EDS para estudo da composição química qualitativa de magnetitas e anfibólios. Basicamente são rochas compostas de quartzo, óxidos e hidróxidos de ferro, anfibólios (da série cummingtonita-grunerita e actinolita-tremolita principalmente), de granulação fina a média e textura granonematoblástica, por vezes com bandamento composicional. Normalmente apresentam teores de Fe_2O_3 variando entre 46 e 59% e de SiO_2 entre 33 e 50%. Petrograficamente identificou-se dois grupos distintos: rochas ferríferas granulares e rochas ferríferas bandadas, encaixadas respectivamente em rochas correlatas ao embasamento gnáissico-migmatítico (Complexo Caicó) e rochas supracrustais correlatas a Formação Jucurutu. A litoquímica permitiu concluir que os grupos de rochas ferríferas granulares e bandadas apresentam comportamentos ora semelhantes, ora distintos. São rochas bimodais, compostas essencialmente de Si e Fe, com pequena proporção de

elementos traços e terras raras. Os parâmetros químicos indicam ambiente predominantemente oxidante e grupos de rochas em posições intermediárias a mais próximas das fontes hidrotermais oceânicas. Quanto a natureza da formação das rochas ferríferas, gráficos binários com as relações entre Th, Zr e Ti permitiram identificar que são rochas puras quimicamente, com poucos níveis de terrígenos. Enquanto diagramas binários de SiO_2 e Al_2O_3 e ternários de Al-Fe-Mn indicam que a totalidade das amostras de formações ferríferas bandadas e granulares configuram sedimentos químico-exalativos hidrotermais. Diagramas específicos para identificação dos ambientes tectônicos para formação das rochas ferríferas granulares e bandadas estudadas na Faixa Seridó indicam principalmente cadeias oceânicas localizadas nas imediações de margens continentais ativas transicionais a arco de ilha. O estudo das formações ferríferas é importante não apenas por concentrarem a maior fonte econômica de ferro nas rochas, como também por serem particularmente essenciais para o entendimento da evolução atmosférica e a composição química dos oceanos no período de sua deposição.

Palavras-chave: Formações ferríferas, petrografia, litoquímica, Faixa Seridó

ABSTRACT

Ferrous rocks occurrences in Rio Grande do Norte central region essentially correspond to small deposits without apparent economic potential. In contrast, during the last years, small deposits of this mineral has been well exploited in some areas of the region, especially within the Rio Piranhas-Seridó Domain. The iron formations occur as decimeters to tens of meters layers intercalated with the Jucurutu Formation gneiss, at the base of Seridó Group metavolcano-sedimentary sequence. They may be associated, but less frequently, with metamafic rocks hosted in the gneiss and possible orthoderived metamorphic rocks from Caico Complex. Systematic mapping at the scales of 1:100,000 (Lajes and Currais Novos geological maps) and mineral resources survey carried out by the Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) identified a significant amount of mineral occurrences (registered 48 occurrences of ferrous rocks). In this work will be performed a macroscopic and microscopic petrographic characterization of thin sections, bipoloid and polished sections of banded iron rocks, besides the discussion of lithochemistry data by analyzing the major elements, trace signing and rare earth elements to defining protolith and tectonic environment, where appropriated, as well as the use of MEV-EDS to study the qualitative chemical composition of magnetites and amphiboles. Basically, these rocks are composed of quartz, iron oxides and hydroxides, amphibole (cummingtonite-grunerite and actinolite-tremolite series), fine- to medium grained and granomatoblastic texture, sometimes with compositional banding. They are formed by Fe_2O_3 content ranging between 46 and 59% and SiO_2 content ranging between 33 and 50%. Petrographically it were identified two distinct groups of ferrous rocks: granular and banded. They occur interlayered respectively, into the migmatitic gneisses from Caicó Complex and in the supracrustal rocks correlated to the Jucurutu Formation. The lithochemistry permitted to conclude that groups of granular and banded iron rocks sometimes present a similar behavior, sometimes not. The bimodal rocks are mainly composed of Si and Fe, with small proportion of trace and rare earths elements. The chemical parameters indicate dominantly oxidant environment and groups of rocks, since intermediate positions to closest the oceanic hydrothermal vents. As for

the nature of the formation of the iron rocks, binary graphs with the relations between Th, Zr and Ti allowed to identify that they are chemically pure rocks, with few levels of terrigenous. While binary diagrams of SiO_2 and Al_2O_3 and Al-Fe-Mn ternaries indicate that all samples of ferriferous banded and granular formations form hydrothermal chemical-exhalation sediments. Specific diagrams for the identification of the tectonic environments for the formation of granular iron rocks and banded iron rocks studied in the Faixa Seridó indicate mainly oceanic chains located next to active continental margins transitional to island arc. The iron formation study is important not only because it is the most economical source of iron in the rocks, but is particularly essential to understanding the atmospheric evolution and to the oceanic chemical composition in the period of their deposition.

Keywords: Iron formations, petrography, lithochemistry, Seridó Belt

AGRADECIMENTOS

A grande dificuldade em começar a agradecer é o medo de cometer injustiças e esquecer quem contribuiu de maneira mais significativa. O incentivo e desejo de sucesso vem de todos os cantos, a todo o momento e por isso sou muito grato. É certo que como Cristão convicto eu tenha que começar agradecendo ao Deus pai, que nos momentos mais difíceis desse caminho cheio de obstáculos me deu forças para não desistir. Trabalhar, estudar e administrar a vida pessoal não é fácil !

Obrigado aos meus queridos e afetuosos amigos, que muito falaram para persistir. Seja a turma do trabalho (família Nana), como da SUREG-RE, seja a turma da UFRN ou mesmo aqueles que a vida me presenteou.

Obrigado aos meus amados pais seu Jonas e Dona Renereide, minha base, meu alicerce.

Obrigado ao corpo de professores e coordenação do PPGG da UFRN, em especial ao meu orientador Marcos Nascimento pela paciência e por ter acreditado em mim desde o início. À Nilda meu sincero agradecimento, pelo carinho e atenção de sempre.

Obrigado aos gestores da CPRM pelo apoio e confiança, primeiramente ao Adeilson Wanderley e nos últimos dois anos a Ana Cláudia Accioly. Obrigado Maria da Guia, não apenas pelo incentivo no ambiente de trabalho, mas pela amizade, carinho, respeito e cada palavra que me empurrou para o rumo certo.

A todos os colegas de trabalho, em especial Alan, Rogério, Pamella, Katiane, Ludmila, Izaac, Vladimir, André Luiz, André Spicila e nossa querida Juliana. Além da turma de Recife (Silvana Diene, Roberta, Cleide, Débora, Geysson, Angelica, Silvana Melo e Patrícia Inacia).

Obrigado Katiane, Pamella, Rogério e Mirnis por alguma contribuição nesta dissertação, seja em uma figura, a construção de um índice ou a conferência da lista de referências e abstract. Mateus meu amigo, valeu por tudo, especialmente no apoio durante as análises de MEV. Vocês foram essenciais.

Obrigado Pauletti, Camilla, Juninho, Crenilson, Célsula, Sávio e as vizinhas Bia e Rafaella que também deram sua contribuição de uma forma ou de outra.

Obrigado ao amigo Wendel pelas palavras de encorajamento nessa reta final !

É isso... Obrigado !!! Meu muito obrigado !!!

ÍNDICE DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 1 – Introdução	01
1.1 – Apresentação	01
1.2 – Justificativa e Objetivos	01
1.3 – Localização e Vias de Acesso	02
1.4 – Materiais e Métodos	04
Capítulo 2 – Geologia Regional e Local	06
2.1 – Geologia Regional	06
2.1.1 – Introdução	06
2.1.2 – Domínio Rio Piranhas – Seridó	08
2.1.3 – Formações ferríferas no Rio Grande do Norte	10
2.2 – Geologia Local	12
2.2.1 – Introdução	12
2.2.2 – Cartografia de rochas ferríferas com uso de sensores remotos	14
2.2.3 – Estratigrafia e geologia estrutural das áreas de estudo	23
Capítulo 3 – Revisão sobre Formações Ferríferas e Estado da Arte dos Estudos de Rochas Ferríferas no Rio Grande do Norte	34
3.1 – Revisão sobre Formações Ferríferas	34
3.1.1 – Conceito e classificação de formações ferríferas	34
3.1.2 – Mecanismos de geração dos depósitos de ferro	37
3.1.3 – Tipos de depósitos de minério de ferro	40
3.2 – Estado da Arte dos Estudos de Rochas Ferríferas no Rio Grande do Norte	42
3.2.1 – Introdução	42
3.2.2 – Domínio São José de Campestre	42
3.2.3 – Domínio Rio Piranhas-Seridó	46

Capítulo 4 – Petrografia das Formações Ferríferas	51
4.1 – Introdução	51
4.2 – Rochas Ferríferas Granulares	52
4.3 – Rochas Ferríferas Bandadas	56
4.4 – Análises de MEV e EDS	61
4.5 – Associações Minerais e Paragênese	69
Capítulo 5 – Litoquímica das Formações Ferríferas	75
5.1 – Introdução	75
5.2 – Litoquímica dos Elementos Maiores	75
5.3 – Litoquímica dos Elementos Traços	78
5.4 – Litoquímica dos Elementos Terras-Raras (ETR)	83
5.5 – Natureza e Ambiente Tectônico das Formações Ferríferas	89
Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações Finais	96
6.1 – Considerações Finais sobre Petrografia e os Dados Litoquímicos	96
6.2 – Recomendações Finais	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXO	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização das áreas de estudo (polígonos sudoeste - SW e nordeste - NE) na porção central do Estado do Rio Grande do Norte. A imagem corresponde ao mosaico de imagens Landsat, composição RGB 321 retirado do software Google Earth versão 7.1.4.1529, dia 15/06/2016. No detalhe a localização das áreas de estudo no contexto da articulação das cartas topográficas na escala 1:100.000 das folhas Lajes, Currais Novos, Açu e Santa Cruz.	03
Figura 2.1 – Contexto das áreas de estudo na compartimentação tectônica da Província Borborema (Rodrigues et al. 2011) no conceito de subprovíncias de Delgado et al. (2003).	06
Figura 2.2 - Compartimentação tectônica do estado do Rio Grande do Norte (Medeiros et al. 2010), com a localização das áreas de estudo (polígonos sudoeste e nordeste).	09
Figura 2.3 – Aspecto textural de formação ferrífera granular em amostra de mão. (Localidade de Santa Polônia, Lajes/RN).	13
Figura 2.4 – Aspecto textural de formação ferrífera bandada em amostra de mão. (Localidade de Boqueirão, São Tomé/RN).	13
Figura 2.5 – Mapa geológico simplificado da área de estudo nordeste com a localização das ocorrências minerais de formação ferrífera e os pontos de ocorrência mineral com coleta de amostra para litoquímica (compilado de Costa & Dantas 2014, Dantas & Costa 2014, Cavalcante et al. 2015). Datum WGS84, Zona 24-Sul.	15
Figura 2.6 – Mapa geológico simplificado da área de estudo sudoeste com a localização das ocorrências minerais de formação ferrífera e os pontos de ocorrência mineral com coleta de amostra para litoquímica (compilado de Medeiros et al. 2012b e Cavalcante et al. 2015). Datum WGS84, Zona 24-Sul.	16
Figura 2.7 – Imagens aerogeofísicas de intensidade magnética total anômala (Medeiros et al. 2012b e Costa & Dantas 2014) utilizadas para delimitação de alvos magnéticos potenciais para ocorrências de rochas ferríferas.	18
Figura 2.8 – Imagens aerogeofísicas do sinal analítico da anomalia do campo magnético total residual (Medeiros et al. 2012b e Costa & Dantas 2014) utilizadas para delimitação de alvos magnéticos potenciais para ocorrências de rochas ferríferas.	19
Figura 2.9 – Alvos magnéticos potenciais para ocorrências de rochas ferríferas delimitados pelo uso de imagens aeromagnéticas nas áreas de estudo dos polígonos nordeste e sudeste.	20

- Figura 2.10 – Detalhe de algumas das imagens processadas no entorno da mina de Saquinho com melhores resultados apresentados para ocorrência de rochas ferríferas e interpretação da cartografia das formações ferríferas. Destaque para os setores de Saquinho e Saco Seco (Indicado pelas setas brancas e amarelas, respectivamente). 22
- Figura 2.11– Ortognaisse de composição granítica migmatizado. (Caiçara do Rio do Vento/RN). 25
- Figura 2.12 – Detalhe da metaultramáfica da serpentinizada, localizado a 1,2 km a sudeste da mina Bonfim (Lajes/RN). 25
- Figura 2.13 - Aspecto de campo dos *augen* gnaisses do Complexo Caicó a noroeste da cidade de Lajes/RN. 26
- Figura 2.14 – Afloramento com intercalação de biotitas gnaissé com lentes de mármore e rochas calcissilicáticas (Formação Jucurutu), no leito do riacho Dois Rios, na região de Cafucá (Bodó/RN). 26
- Figura 2.15 – Afloramento de formação ferrífera bandada e dobrada da Formação Jucurutu, localizado na Fazenda Itapuã (Lajes/RN). 27
- Figura 2.16 - Formação ferrífera bandada em trincheira na área de Saco Seco, na região da mina de Saquinho em Cruzeta/RN. É possível observar o mergulho de baixo ângulo da camada de rocha e o limite com o colúvio. 27
- Figura 2.17 – Concentração de blocos centimétricos a decimétricos de formação ferrífera na localidade de Riachão, 7,8 km noroeste da mina de Saquinho (Caicó/RN). 27
- Figura 2.18 – Concentração de blocos métricos de formação ferrífera bandada, localizada 900m sudeste do Alvo Saco Seco na região da mina de Saquinho. (Cruzeta/RN). 27
- Figura 2.19– Afloramento de formação ferrífera bandada da Formação Jucurutu localizada na Cava 01 próxima a sede da Mina de Saquinho (Cruzeta/RN). 28
- Figura 2.20 - Afloramento de formação ferrífera bandada da Formação Jucurutu localizado na Fazenda Itapuã (Lajes/RN). 28
- Figura 2.21 – Perfil A-A’ de direção NW-SE da região da Serra do Feiticeiro e Fazenda Itapuã no município de Lajes/RN, modificado de Barbalho (1992). O Contato entre as unidades do Grupo Seridó (Formações Equador e Jucurutu) e do Complexo Caicó são marcadas por empurrões em zonas de rochas milonitizadas. Na Fazenda Itapuã a formação ferrífera ocorre encaixada em biotita gnaissé da Formação Jucurutu, sotoposta por camada de mármore nos flancos de uma dobra em bainha. O perfil está orientado na figura 2.5. 28
- Figura 2.22 – Perfil B-B’ de direção SW-NE da região da cava do Alvo 05 da mina de 29

Saquinho, no município de Cruzeta/RN. A formação ferrífera ocorre encaixada em gnaisses da Formação Jucurutu, com lentes de anfibolitos, metaultramáficas e quartzitos, sotoposto por camadas de mármore. Todas essas rochas repousam sobre os augens gnaisses do Complexo Caicó e todo o pacote rochoso apresenta dobramentos suaves com planos axiais paralelos à direção da foliação regional, cortados por falhas posteriores ao evento tectônico principal. Os falhamentos formam um conjunto de blocos altos e baixos. O perfil está orientado na figura 2.6.

Figura 2.23 – Detalhe dos muscovita quartzitos da Formação Equador (Serra do Feiticeiro). 29

Figura 2.24 – Afloramento composto por camada de metaconglomerado oligomítico relacionado a Formação Equador (Sitio Pedra Preta de Baixo, São Tomé/RN). 29

Figura 2.25 – Aspecto de campo do micaxisto da Formação Seridó situado na localidade de Riacho Fechado (Currais Novos/RN). 30

Figura 2.26 – Granada micaxisto da Formação Seridó na localidade de Conrado, na região da mina São Francisco (Currais Novos/RN). 30

Figura 2.27 – Nódulos centimétricos de cordierita em micaxistos da Formação Seridó, na localidade de Riacho Fechado (Currais Novos/RN). 30

Figura 2.28 – Cristais milimétricos de estaurolita (setas amarelas) e nódulos centimétricos de cordierita (setas vermelhas) associados aos micaxistos da Formação Seridó, na região de Malhadinha (Pedra Preta/RN). 30

Figura 3.1 – Ambientes tectônicos e tipos de formações ferríferas associadas (Gross 1980). 36

Figura 3.2 – Painel do Hall of Planet Earth do American Museum of Natural History sobre as condições necessárias para deposição das formações ferríferas bandadas do Paleoproterozoico e Arqueano. Disponível em: http://www.amnh.org/var/ezflow_site/storage/images/media/amnh/images/exhibitions/permanent-exhibitions/rose-center-for-earth-and-space/hall-of-planet-earth2/hope-illustrations/origins-of-the-banded-iron-formation_ill/1011633-1-eng-US/origins-of-the-banded-iron-formation_ill.jpg. Acesso: 13/09/2016. 39

Figura 4.1 – Foto das lâminas delgadas das amostras AR-R-012 (A), EL-16A (B), RF-035 (C), AR-R-096 (D), RF-102 (D) e AR-R-192A seção XZ (E). As amostras dos itens A, B e C representam as formações ferríferas granulares. Os itens D, E e F são as formações ferríferas bandadas. Em incolor ocorrem os níveis de quartzo. Os grãos e níveis em preto 51

são os minerais opacos (magnetita e/ou hematita). Em verde são os anfibólios e com tons avermelhados os hidróxidos de ferro.

Figura 4.2 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicois paralelos mostrando a formação ferrífera com os minerais opacos disseminados (cor preta) em contato com cristais de quartzo (cinza claro a branco). São dois grupos de minerais opacos com granulometrias distintas. Amostra AR-R-217A. 53

Figura 4.3 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicois cruzados mostrando a formação ferrífera com os minerais opacos disseminados (cor preta) em contato com cristais de quartzo (cinza claro a escuro) xenoblásticos a sub-idioblásticos. Amostra AR-R-217A. 53

Figura 4.4 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicois paralelos mostrando os cristais de anfibólio (Anf), quartzo (Qz) e opacos (Op) presentes na formação ferrífera. Os anfibólios são possivelmente da série cummingtonita-grunerita, exibem-se fortemente estirados e orientados na direção da foliação. Amostra AR-R-217B. 54

Figura 4.5 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicois paralelos mostrando os cristais de anfibólio (Anf), quartzo (Qz) e opacos (Op) presentes na formação ferrífera. O anfibólio no centro da foto apresenta textura poiquiloblástica, com inclusões de quartzo e minerais opacos. Amostra EL-16A. 54

Figura 4.6 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicois cruzados de formação ferrífera granular com intensa alteração hidrotermal e formação de hidróxidos de ferro (Hfe) substituindo minerais opacos (Op) e anfibólios (Anf), provavelmente grunerita. Amostra ML-542B. 55

Figura 4.7 – Fotomicrografia de seção bipolarizada com luz transmitida plano-polarizada de formação ferrífera granular composta essencialmente por quartzo (Qtz), magnetita (Mt) martitzada e prismas orientados de anfibólios (Anf). Amostra AR-R-217A. 55

Figura 4.8 – Fotomicrografia de seção bipolarizada com luz refletida de cristais de magnetita (Mt) bastante transformados para hematita (Hem) nas bordas e ao longo de fraturas. A rocha é uma formação ferrífera granular. Amostra AR-R-217A. 55

Figura 4.9 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicois paralelos mostrando a biotita (Bt) marrom, com hábito planar, associada com minerais opacos (Op), anfibólio (Anf) e quartzo (Qz). Amostra RF-032. 55

Figura 4.10 – Fotomicrografia de lâmina delgada e nicois paralelos mostrando os cristais de anfibólio presentes na formação ferrífera bandada, possivelmente da série cummingtonita-grunerita (minerais verde oliva e verde escuro). As bandas mais ricas em 57

- anfíbólios também contêm quartzo e minerais opacos disseminados. Amostra AR-R-096.
- Figura 4.11 - Fotomicrografia de lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando os cristais de anfíbólio presentes na formação ferrífera bandada (níveis milimétricos mais ricos em quartzo de cor branca, anfíbólio de cores esverdeadas e minerais opacos de cor negra). As faixas de quartzo e opacos domina a textura granoblástica enquanto a faixas mais ricas em anfíbólio exibe uma textura nematoblástica. Amostra AR-R-192A. 57
- Figura 4.12 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis paralelos de formação ferrífera bandada, alternando banda milimétrica quartzosa de cor branca, anfíbolítica de cor esverdeada e ferrífera de cor preta. Percebem-se níveis granulométricos de minerais opacos de tamanhos distintos (finos e muito finos, na parte superior e central da foto, respectivamente). As bandas são fortemente orientadas e alongadas na direção da foliação. Amostra AR-R-096. 58
- Figura 4.13 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando a formação ferrífera bandada dobrada, alternando bandas quartzosas (minerais incolores ou brancos), anfíbolíticas (minerais esverdeados) e ferríferas (minerais negros). Amostra AR-R-213. 58
- Figura 4.14 – Fotomicrografia de lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando a formação ferrífera bandada, alternando bandas quartzosas, anfíbolíticas e ferríferas dobradas. Amostra AR-R-192C. 58
- Figura 4.15 – Fotomicrografia de lâmina delgada e nicóis cruzados mostrando a formação ferrífera bandada, alternando bandas quartzosas, anfíbolíticas e ferríferas dobradas. Amostra AR-R-192C. 58
- Figura 4.16 – Fotomicrografia de seção polida com luz refletida de formação ferrífera bandada composta essencialmente por quartzo (Qz) e magnetita (Mt) martitizada. Amostra AR-R-192C. 59
- Figura 4.17 – Fotomicrografia de seção polida com luz refletida de cristais xenoblásticos de magnetita (Mt) fortemente martitizada, ou seja, transformada em hematita (Hem), em formação ferrífera bandada. Amostra AR-R-213. 59
- Figura 4.18 – Fotomicrografia de seção polida com luz refletida de formação ferrífera bandada rica em hematita especular em duas gerações de cristalização. A primeira está alinhada segunda a superfície Sn que está dobrada. A segunda está alinhada segundo a superfície de plano axial Sn+1. O polígono amarelo é o detalhe apresentado na foto 4.19. Amostra HS-007A da mina de Saquinho. 60
- Figura 4.19 – Fotomicrografia de seção polida com luz refletida de cristais xenoblásticos 60

de magnetita (Mt) associados ou inclusos em cristais de hematita especular (Hem). Amostra HS-007A da mina de Saquinho.

Figura 4.20 – Apresentação dos dados de MEV e EDS para a amostra AR-012 de formação ferrífera granular. Em (A) observa-se a imagem em tons de cinza dos elétrons retroespalhados (BSE) produzida no MEV. Os grãos de quartzo (Qz) tem tonalidade de cinza mais escura, os anfibólios (Anf) apresentam um cinza intermediário e os óxidos de ferro (Op) tem tonalidade cinza clara. (B) representa o mapeamento elementar individual gerado pelo EDS. No caso da amostra analisada é possível observar imagens dos seis elementos químicos identificados separadamente. Os óxidos de ferro têm seus contornos facilmente marcados no mapa elementar do Fe em vermelho. O quartzo é evidente em tons amarelos no mapa elementar da Si. Os anfibólios são melhores identificados nos mapas do Ca e Mg. Considerar que a maior abundância elementar está representada pelas tonalidades de cores mais claras. 62

Figura 4.21 – Apresentação dos dados de MEV e EDS para a amostra AR-213 de formação ferrífera bandada. Em (A) observa-se a imagem em tons de cinza dos elétrons retroespalhados (BSE) produzida no MEV. Os grãos de quartzo (Qz) tem tonalidade de cinza mais escura, os anfibólios (Anf) apresentam um cinza intermediário e os óxidos de ferro (Op) tem tonalidade cinza clara. B) representa o mapeamento por elemento individual gerado pelo EDS. No caso da amostra analisada é possível observar imagens dos seis elementos químicos identificados separadamente. Os óxidos de ferro têm seus contornos facilmente marcados no mapa elementar do Fe em rosa. O quartzo é evidente em tons amarelos no mapa elementar da Si. Os anfibólios são melhor identificados no mapa do Mg. Considerar que a maior abundância elementar está representada pelas tonalidades de cores mais claras. 63

Figura 4.22 – Análise com EDS da química mineral do cristal 2 de anfibólio na amostra AR-192C de formação ferrífera bandada. Em (A) observa-se a imagem em tons de cinza dos elétrons retroespalhados (BSE) produzida no MEV. O círculo amarelo corresponde à área de leitura da química mineral. Os grãos de quartzo (Qz) tem tonalidade de cinza mais escura, os anfibólios (Anf) apresentam um cinza intermediário e os óxidos de ferro (Op) tem tonalidade cinza clara. Em (B) é apresentado o espectrograma por energia dispersiva com a ordem dos elementos para os picos da série K e L, como resposta da leitura da área do círculo amarelo em (A). (C) corresponde à tabela com o resultado da química mineral lida na região do círculo amarelo em (A). O dado utilizado é o de concentração 65

normalizada (100%) em percentagem de peso (C norm. [wt.%]).

Figura 4.23 – Análise com EDS da química mineral de cristal de óxido de ferro (magnetita/hematita) na amostra RF-035 de formação ferrífera granular. Em (A) observa-se a imagem em tons de cinza dos elétrons retroespalhados (BSE) produzida no MEV. O círculo amarelo corresponde à área de leitura da química mineral. Os grãos de quartzo (Qz) têm tonalidade de cinza mais escura e os óxidos de ferro tem tonalidade cinza clara (Op). A massa mineral indicada pela seta vermelha corresponde a anfibólio (Anf) com hidróxidos de ferro (Hfe). Em (B) é apresentado o espectrograma por energia dispersiva com a ordem dos elementos para os picos da série K e L, como resposta da leitura da área do círculo amarelo em (A). (C) corresponde à tabela com o resultado da química mineral lida na região do círculo amarelo em (A). O dado utilizado é o de concentração normalizada (100%) em percentagem de peso (C norm. [wt.%]).

Figura 4.24 – Fotomicrografia com nicóis paralelos de lâmina delgada de formação ferrífera bandada (amostra AR-R-192C). (A) Observa-se os níveis mais ricos em minerais opacos (Opc) de cor preta e níveis mais ricos em quartzo (Qz) de cor esbranquiçada. Os anfibólios (Anf) são os minerais alongados de cores cinza a esverdeadas. Os opacos correspondem a cristais de magnetita e os anfibólios correspondem a cristais de ferro actinolita. (B) Observa-se a mesma fotomicrografia de (A) com a interpretação de duas gerações de minerais opacos (magnetitas): Opc 1 (linha tracejada vermelha) e Opc 2 (linha pontilhada vermelha); além das duas gerações de anfibólios: Anf 1 (linha tracejada amarela) e Anf 2 (linha pontilhada amarela).

Figura 5.1 – Distribuição dos elementos químicos maiores das rochas ferríferas granulares (A) e bandadas (B) (linhas rosada e azul clara, respectivamente) localizadas nas áreas de estudo dos polígonos nordeste e sudoeste, em comparação com as médias dos tipos Algoma, Lago Superior e Rapitan do Canadá (linhas cinza, azul e verde, respectivamente). 1-LS: Fácies óxido - Tipo Lago Superior (Gross & McLeod 1980); 2-ALG: Fácies óxido - tipo Algoma (Gross & McLeod 1980); 3-RAP: Formações ferríferas bandadas do Canadá - Tipo Rapitan (Klein & Beukes 1993). Os polígonos em rosa e azul claro correspondem ao envelope com os resultados das análises químicas apresentadas neste trabalho.

Figura 5.2 – Correlação SiO_2 versus Fe_2O_{3T} para o total de 17 amostras de ocorrências de rochas ferríferas granulares e bandadas na Faixa Seridó, encaixadas nas rochas do Complexo Caicó e Formação Jucurutu, na região central do Estado do Rio Grande do Norte. O valor de R^2 , correspondente ao coeficiente de correlação, é muito próximo de 1,

indicando o ajustamento estatístico entre as amostras.

Figura 5.3 – Gráficos bivariantes com coeficientes de correlação mais significativos dos elementos traços Ni, Rb e Sr em ppm *versus* Al_2O_3 , K_2O e Na_2O em %, para as rochas ferríferas granulares e bandadas encaixadas no Complexo Caicó e Formação Jucurutu, respectivamente. Os gráficos estão em escala logarítmica no eixo da ordenada. As linhas vermelha e verde indicam a linha de tendência para as formações ferríferas (FF) bandadas e granulares, respectivamente. 81

Figura 5.4 – Gráfico multielementar da distribuição de teores de elementos traços normalizados ao PAAS para as formações ferríferas granulares (A) e bandadas (B) das áreas de estudo. Escala vertical mostra valores de concentração (ppm) em escala logarítmica. As maiores concentrações de elementos traços litófilos (Rb, Sr, Y, Zr) estão relacionadas ao grupo de formações ferríferas (FF) depositadas em sítios distais, enquanto que os elementos Co, Ni e Cu têm suas maiores concentrações relacionados ao grupo de FF depositadas em sítios proximais as fontes hidrotermais (Gross 1983, Bekker et al. 2010). 82

Figura 5.5 – Anomalia de Ce/Ce* normalizado pelo NASC *versus* Nd das ocorrências de rochas ferríferas (FF) granulares e bandadas das áreas de estudo, na região central do Rio Grande do Norte. 85

Figura 5.6 – Gráfico da anomalia de Ce/Ce* *versus* Pr/Pr* normalizados pelo PAAS (Bau & Dulski 1996) para as rochas ferríferas granulares e bandadas das áreas de estudo. I - sem anomalia; IIa - anomalia positiva de La causa aparente anomalia negativa de Ce; IIb - anomalia negativa de La causa aparente anomalia positiva de Ce; IIIa - real anomalia positiva de Ce; IIIb - real anomalia negativa de Ce; IV - anomalia positiva de La disfarçada de anomalia positiva de Ce. 86

Figura 5.7 – Padrão ETR normalizado ao PAAS (Post-Arquean Australian Shale) para as amostras de rochas ferríferas granulares (A) e bandadas (B) nas áreas de estudo dos polígonos nordeste e sudoeste na Faixa Seridó. 88

Figura 5.8 – Diagramas binários utilizando elementos traços para análise de pureza de formações ferríferas segundo Viehmann et al. (2016). (A) Ti *versus* Zr; (B) Zr *versus* Th e (C) Ti *versus* Th. Nesses gráficos, o campo "detritos" indica onde estão plotadas as amostras de sedimentos siliciclásticos finos. O campo "FFB Pura" reflete onde estão plotadas as amostras de formações ferríferas (FF's) puras. As FF's da Faixa Seridó estão posicionadas principalmente internas ou nas imediações dos campos "FFB Pura", 90

refletindo seus elevados graus de pureza, com baixa contribuição sedimentar.

Figura 5.9 – (A) Diagrama binário Al_2O_3 versus SiO_2 de Bonati (1975) e (B) Diagrama ternário Al-Fe-Mn de Adachi et al. (1986) mostrando o tipo de formação ferrífera em relação ao processo genético. Em ambos os casos as formações ferríferas granulares e bandadas estudadas na Faixa Seridó estão relacionadas a fluidos hidrotermais de água oceânica. 91

Figura 5.10 – (A) Diagrama $Al_2O_3/(100-SiO_2)$ x $Fe_2O_3/(100-SiO_2)$ (Murray 1994) com as amostras de formações ferríferas (FF) granulares e bandadas da Faixa Seridó próximas ao campo de cadeias oceânicas. (B) Diagrama SiO_2 x Ka_2O/Na_2O (Roser & Korsch 1986) com as amostras de formações ferríferas granulares e bandadas da Faixa Seridó principalmente entre os campos de margens continentais ativas e arcos de ilha. 92

Figura 5.11 – (A) Modelo simplificado do proposto por Abrahão Filho (2016) para o quadro geotectônico existente no período da gênese das rochas ferríferas no DSJC de um ambiente de oceano em estágio evolucionário avançado, com uma cadeia oceânica prestes a subductar. (B) trata-se do detalhe da área tracejada vermelha na figura A. As rochas ferríferas granulares e bandadas das áreas de estudo na Faixa Seridó apresentam comportamento similar nos gráficos de ambiência tectônica à apresentada pelas rochas ferríferas depositadas no DSJC. 93

Figura 5.12 – Modelo deposicional proposto para as formações ferríferas granulares e bandadas estudadas nas áreas sudoeste e nordeste da Faixa Serido (compilado de Sial et al. 2015). O quadrado cinza claro representa a amostra coletada. Em verde estão identificadas as amostras de formações ferríferas bandadas (correlacionadas as rochas da Formação Jucurutu) e em roxo as formações ferríferas granulares (correlacionadas as rochas do Complexo Caicó). Notar que próximo ao continente às formações ferríferas apresentam componentes siliciclásticos diluídos. A deposição das formações ferríferas ocorre na camada ferruginosa do oceano (óxica) em sítios mais distais ou mais proximais as chaminés hidrotermais. 95

Figura 6.1 – Modelo deposicional proposto para as formações ferríferas granulares e bandadas, encaixadas, respectivamente, nas rochas do Complexo Caicó e Formação Jucurutu, das áreas de estudo na Faixa Serido. O cenário atual indica a disposição geológica das rochas em perfil. 100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Principais feições de cada fácies de formações ferríferas de James (1954). Compilado de Chemale Junior & Takehara (2013).	35
Tabela 4.1: Resultado da química elementar semiquantitativa de cristais de anfibólios, anfibólios alterados com hidróxidos de ferro (hidrox fe) e óxidos de ferro (magnetita ou hematita – Mag/Hem) adquirido no EDS para rochas ferríferas granulares e bandadas da área de estudo. Dados em concentração normatizada em percentagem de peso.	67
Tabela 4.2: Resultado da classificação dos anfibólios segundo Leake et al. (1997) obtidos a partir da análise química elementar semiquantitativa de cristais de anfibólios adquirida no EDS para rochas ferríferas granulares e bandadas da área de estudo.	68
Tabela 4.3: Quadro resumo com os principais minerais constituintes, textura e estrutura microscópica das rochas ferríferas da área de estudo.	70
Tabela 4.4: Sequência paragenética hipotética para os minerais essenciais das rochas ferríferas das áreas de estudo. (*) Os eventos de pós-metamorfismo podem incluir hidrotermalismo ou intemperismo.	73
Tabela 5.1 – Grupo de amostras analisadas no tratamento de dados geoquímicos no contexto da textura da rocha, da litoestratigrafia da rocha encaixante (CC – Complexo Caicó; FJ – Formação Jucurutu) e das áreas de estudo na Faixa Seridó.	75
Tabela 5.2 – Análises químicas dos elementos maiores das rochas ferríferas granulares e bandadas, encaixadas no Complexo Caicó e nas rochas da Formação Jucurutu nas áreas de estudo.	76
Tabela 5.3 – Análises químicas dos elementos traços das rochas ferríferas granulares e bandadas, além de uma amostra de minério de ferro maciço (RF-089A), encaixadas no Complexo Caicó e nas rochas da Formação Jucurutu, na região central do Rio Grande do Norte.	79
Tabela 5.4 – Matriz de correlações entre os elementos maiores e os elementos traços para as rochas ferríferas granulares correlatas ao Complexo Caicó e formações ferríferas bandadas correlatas aos metassedimentos da Formação Jucurutu. Correlações entre 0,7 e 0,9, positivas ou negativas, estão em negrito. Em vermelho estão às correlações positivas ou negativas maiores que 0,9.	80
Tabela 5.5 – Análises químicas dos elementos terras raras e ítrio (Y) das rochas ferríferas	83

granulares e bandadas, encaixadas respectivamente no Complexo Caicó e nas rochas da Formação Jucurutu, na região central do Rio Grande do Norte.

Tabela 5.6 – Resultados do cálculo do parâmetro Ce/Ce* normalizado pelo NASC (*North American Shale Composite*) para as amostras de rochas ferríferas granulares e bandadas das áreas de estudo, na região central do Rio Grande do Norte. 85

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

BIFs	Banded Iron Formations
BSE	<i>Backscattered electrons</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CDM	Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Rio Grande do Norte
D1	Primeiro Evento Deformacional
D2	Segundo Evento Deformacional
D3	Terceiro Evento Deformacional
DPS	Domínio Rio-Piranhas-Seridó
DSJC	Domínio São José do Campestre
EDS	Sistema de Energia Dispersiva
ERP	Embasamento Rio Piranhas
eTh	Equivalente Tório
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
ETR	Elementos Terras Raras
ENTRY	Elementos Terras Raras e Ítrio
ETRL	Elementos Terras Raras Leves
ETRP	Elementos Terras Raras Pesados
eU	Equivalente Urânio
FF	Formação Ferrífera
FF's	Formações Ferríferas
FFB's	Formações Ferríferas Bandadas
FSE	Faixa Seridó
Ga	Bilhões de Anos
HRGB	<i>Hue-Red-Green-Blue</i>
ICP-MS	Espectrômetro de Plasma Acoplado
IHS	Intensity-Hue-Saturation
IOCG	<i>Iron Oxide Copper Gold Ore Deposits</i>
km	Quilômetro
LV	Linhas de Voo
LC	Linhas de Controle

m	Metro
Ma	Milhões de Anos
mm	Milímetro
MORB	<i>Mid-Ocean Ridge Basalt</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NASC	<i>North American Shale Composite</i>
PAAS	<i>Pos-Archean Australian Shale</i>
RGBI	Red-Green-Blue-Intensity
RN	Rio Grande do Norte
Sm-Nd	Método Samário - Neodímio
TDM	Idade Modelo
U-Pb	Datação Urânio - Chumbo
UV	Radiação Ultravioleta
VMS	Sulfetos Maciços Vulcanogênicos
XRF	Fluorescência de Raios X

Capítulo 1

Capítulo 1 - Introdução

1.1 – Apresentação

A presente dissertação é parte da exigência para a obtenção do grau de Mestre em Geodinâmica pelo Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), juntamente com a submissão de pelo menos um artigo científico em periódico nacional ou internacional. Este trabalho foi orientado pelo professor Doutor Marcos Antonio Leite do Nascimento e está inserido no tema de gênese de depósitos de minerais metálicos, incluso na linha de pesquisa de Evolução Litosférica e Processos Geodinâmicos. Consta de 05 (cinco) capítulos + anexo e relatará a análise de dados e o estado da arte do estudo intitulado “Petrografia e Litoquímica de Rochas Ferríferas na região central do Estado do Rio Grande do Norte (Domínio Rio Piranhas - Seridó, NE da Província Borborema)”.

A maior parte dos dados aqui trabalhados é oriunda de dois projetos de mapeamento geológico e de cadastramento de recursos minerais que fizeram parte do Programa Geologia do Brasil, executados entre os anos de 2009 e 2014 pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) através dos projetos Folha Currais Novos (SB.24-Z-B-II) e Folha Lajes (SB.24-X-D-VI). Nestes projetos foram realizadas cartografia geológica na escala 1:100.000 e coleta de amostras para petrografia e litoquímica, além de posteriores análises químicas de rocha total e confecção de lâminas delgadas e seções polidas. Algumas análises de MEV (microscópio eletrônico de varredura) e EDS (sistema de energia dispersiva) foram utilizadas para o reconhecimento da composição química de alguns minerais em análises semiquantitativas.

1.2 – Justificativa e Objetivos

O estudo das formações ferríferas é importante não apenas por concentrarem a maior fonte econômica de ferro nas rochas, mas são particularmente essenciais para o entendimento da evolução atmosférica, a composição química dos oceanos e o surgimento de vida na Terra (Spier et al. 2007).

As ocorrências de formações ferríferas encaixadas em rochas correlatas a Formação Jucurutu e aquelas que ocorrem em rochas do embasamento gnáissico-migmatítico (correlatas ao Complexo Caicó) poderá contribuir para o entendimento da evolução litosférica da região e suas relações com sistemas mineralizantes, sejam eles

magmáticos e/ou magmático-hidrotermal (depósitos vulcano-exalativos, de skarn, entre outros). A petrografia e química de rocha com cartografia geológica associada pode ajudar na contextualização dessas ocorrências minerais no Domínio Rio Piranhas – Seridó (Angelim et al. 2006).

Os objetivos principais deste trabalho compreendem: (i) Mostrar a distribuição espacial das rochas ferríferas por meio da cartografia geológica; (ii) Realizar uma caracterização petrográfica macro e microscópica, incluindo análise química mineral semiquantitativa; (iii) Identificar o comportamento químico distinto entre as rochas ferríferas encaixadas nas supracrustais (Formação Jucurutu) e no embasamento (Complexo Caicó); (iv) Analisar os elementos maiores buscando similaridades químicas com as formações ferríferas típicas, fazendo o estabelecimento de sua faciologia, na tentativa de contextualizar as formações ferríferas (FF's) do tipo Algoma ou Superior de Gross & Mcleod (1980) e FF's do tipo Rapitan de Klein & Beukes (1993); (v) Estudar a assinatura dos elementos traços e terras raras para definição de protólitos e ambiente tectônico, quando for o caso.

1.3 – Localização e Vias de Acesso

As áreas de abrangência desse estudo englobam grande parte dos limites das cartas topográficas das folhas Currais Novos (SB.24-Z-B-II) e Lajes (SB.24-X-D-VI) (Figura 1.1). São dois polígonos (NE e SW) que incluem diversas ocorrências de rochas ferríferas nas porções sudoeste e nordeste da região central do Rio Grande do Norte.

O polígono sudoeste (Figura 1.1) é limitado pelas latitudes $-6,00^{\circ}$ e $-6,35^{\circ}$ e longitudes $-36,50^{\circ}$ e $-37,00^{\circ}$ com aproximadamente 2140 km^2 , incluindo principalmente os municípios de Cruzeta, Florânia, Santana dos Matos e Currais Novos. Os principais acessos a essa região, a partir da cidade de Natal, são as rodovias federais BR-226 e BR-427, além das rodovias estaduais RN-088 e RN-288. A RN-088 é uma estrada não pavimentada, mas um dos principais acessos à mina de ferro de Saquinho, a partir da BR-226, próximo à cidade de Florânia.

O polígono nordeste (Figura 1.1) é limitado pelas latitudes $-5,59^{\circ}$ e $-6,00^{\circ}$ e longitudes $-36,00^{\circ}$ e $-36,50^{\circ}$ com cerca de 2500 km^2 , incluindo principalmente os municípios de Lajes, Cerro Corá, Bodó e São Tomé. Os acessos rodoviários ocorrem através da BR-304, que liga Natal a cidade de Lajes, além das rodovias estaduais RN-

203 que dá acesso a São Tomé e RN-129 que liga Lajes até Pedra Preta. A estrada não pavimentada que corresponde ao trecho da BR-104/ RN-042 foi uma importante estrada vicinal utilizada entre as cidades de Lajes e Cerro Corá.

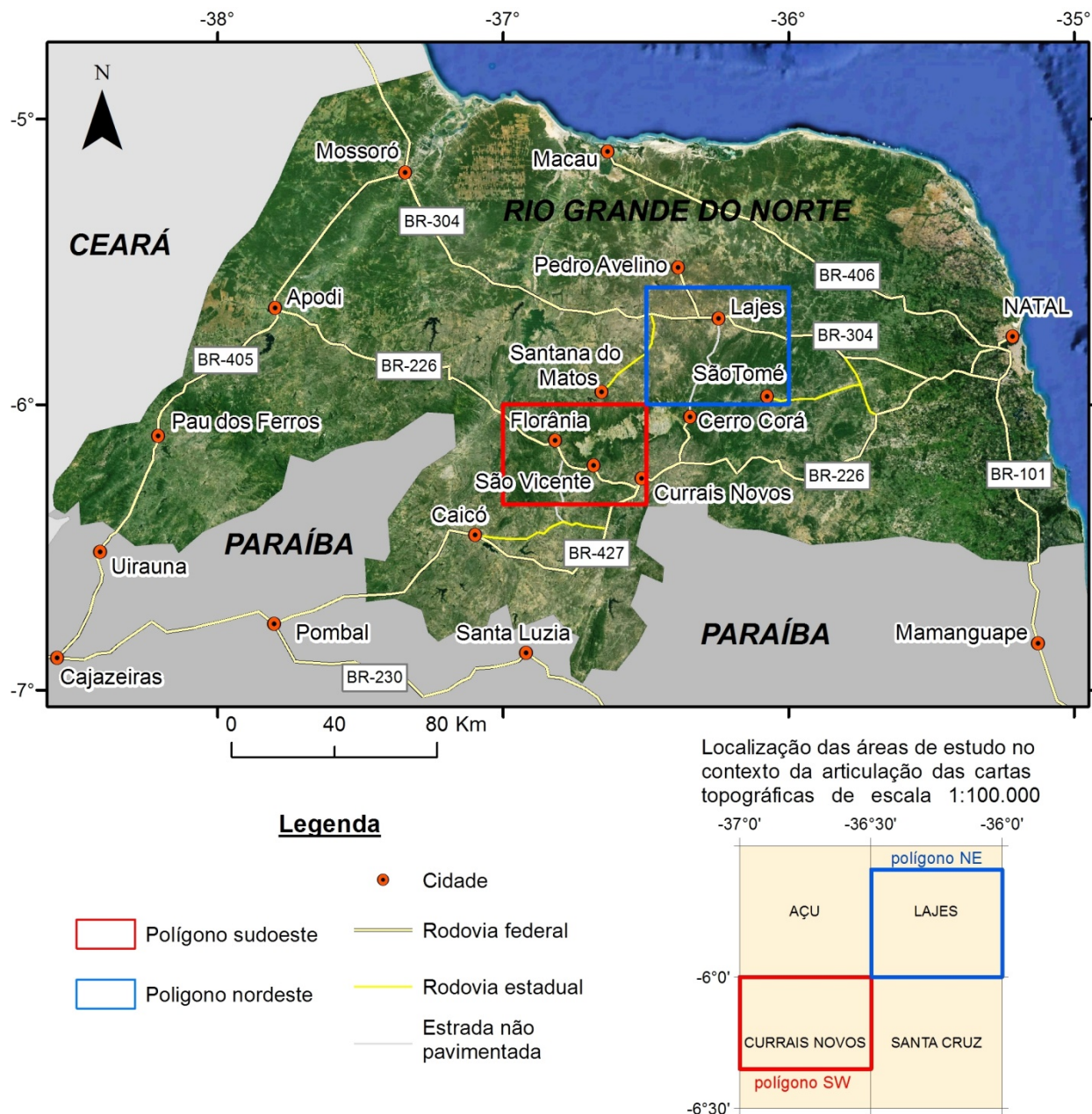


Figura 1.1 – Localização das áreas de estudo (polígonos sudoeste - SW e nordeste - NE) na porção central do Estado do Rio Grande do Norte. A imagem corresponde ao mosaico de imagens Landsat, composição RGB 321 retirado do software Google Earth versão 7.1.4.1529, dia 15/06/2016. No detalhe a localização das áreas de estudo no contexto da articulação das cartas topográficas na escala 1:100.000 das folhas Lajes, Currais Novos, Açú e Santa Cruz.

Ao longo dos polígonos correspondentes as áreas de estudo existem quantidades significativas de estradas carroçáveis que facilitam o acesso a todas as ocorrências de rochas ferríferas.

1.4 – Materiais e Métodos

A metodologia desenvolvida neste trabalho inclui revisão bibliográfica sobre o tema estudado, cartografia com a utilização de sensores remotos (imagens de satélite e aerogeofísicas) como ferramenta de auxílio no mapeamento geológico, aquisição de amostras de rochas ferríferas para química de rocha e petrografia, tratamento dos dados e estudo de lâminas delgadas e seções polidas, elaboração de artigo científico e por fim a elaboração do texto da presente dissertação.

A pesquisa bibliográfica focou em trabalhos prévios existentes no âmbito do Rio Grande do Norte (Ferreira et al. 1977, Osório 1981, Angelim et al. 2006, Dantas et al. 2004, Dantas e Costa 2014, Campos 2011, Figueiredo 2012, Silva Filho 2012, Barbosa 2013, Ferreira et al. 2015, Sial et al. 2015, Abrahão Filho 2016, entre outros) além de exemplos brasileiros e mundiais pesquisados simultaneamente.

Para a cartografia das rochas ferríferas, além do mapeamento geológico realizado nos projetos citados, foram utilizadas as imagens de satélite Landsat 7 ETM+ e produtos aerogeofísicos de gamaespectrometria e magnetometria. Os mapas aeromagnetométricos foram essenciais para delimitar alvos potenciais para checagem durante as etapas de campo, enquanto os outros produtos para delinear os corpos rochosos correspondentes a essas ocorrências minerais, limitando-se evidentemente a sua resolução espacial.

A aquisição dos dados nas duas áreas de estudo (Figura 1.1) foi realizada durante as atividades executadas em projetos já finalizados da CPRM e citados anteriormente no item 1.1 deste capítulo.

Os mapeamentos geológicos sistemáticos na escala de 1:100.000 e levantamento de recursos minerais das folhas Lajes e Currais Novos identificaram uma quantidade significativa de ocorrências de rochas ferríferas (Dantas et al. 2012, Dantas e Costa 2014). Nestes trabalhos foram cadastradas 48 ocorrências e juntamente com este cadastramento foi coletado um total de 17 amostras para litoquímica e confecção de seções delgadas e polidas em afloramentos.

As amostras de rocha coletadas no âmbito do projeto Folha Currais Novos foram enviadas para preparo e análise química de multi-elementos no laboratório da ACME - Analytical Laboratories Ltda. Enquanto as amostras do projeto Folha Lajes foram encaminhados para SGS Geosol Laboratórios Ltda. Em ambos os casos os elementos maiores, menores e traços foram analisados, após fusão por metaborato e digestão

ácida (água régia), em espectrômetro de plasma acoplado (ICP-MS). Algumas amostras tiveram os óxidos analisados por fluorescência de raios X (XRF) após fusão por metaborato.

As lâminas delgadas, bipolidas e seções polidas foram descritas em microscópio óptico de luz transmitida e refletida da marca Olympus BX-51 e *software* de captura de imagem Analysis, com lentes de aumento de 2x até 40x. Desse conjunto, um total de quatro lâminas bipolidas (ou lâminas delgadas polidas) e duas seções polidas foram utilizadas para identificação da composição química mineralógica dos tipos de anfibólios e de óxidos de ferro (magnetitas ou hematitas) através de MEV (microscópio eletrônico de varredura) e EDS (sistema de energia dispersiva).

Para a identificação através de imagens e análises químicas minerais semiquantitativas, respectivamente, com o uso do MEV (microscópio eletrônico de varredura) e EDS (sistema de energia dispersiva), utilizou-se o equipamento de bancada TM3000 com o espectrômetro de energia dispersiva acoplado do modelo Quantax 70, ambos da Hitachi, no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). As análises foram feitas usando voltagem de 5 e 15 kV com filamento de tungstênio, 30 nm de resolução e leitura no EDS de 45 segundos por análise. Esse equipamento possui modo de redução de carga, que utiliza pressão de câmara mais elevada, permitindo a obtenção de imagens de amostras não revestidas.

Para o estudo de litoquímica os dados foram interpretados para análise de elementos maiores, traços e terras raras, utilizando diagramas que reportam composição química e condições paleoambientais dos grupos de rocha analisados.

Para finalizar o trabalho foi realizada a submissão do artigo científico (Anexo) em revista nacional, seguida pela elaboração do texto e defesa da dissertação de mestrado.

Capítulo 2

Capítulo 2 - Geologia Regional e Local

2.1 – Geologia Regional

2.1.1 – Introdução

A Província Borborema foi denominada por Almeida et al. (1977) como o domínio geológico-estrutural localizado no Nordeste Oriental do Brasil, limitado a sul pelo Cráton São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a norte e leste pelas bacias sedimentares da margem costeira (Figura 2.1). É interpretada como um segmento crustal de uma extensa faixa fortemente afetada pela deformação Brasiliana/Pan-Africana (cerca de 700-540 Ma), resultante da colisão entre os crátons do Oeste Africano/São Luís e Congo/São Francisco, que constituíam massas continentais consolidadas em tempos pré-Brasilianos (Jardim de Sá 1994, Brito Neves et al. 2001). É formada por sequências metassedimentares e metavulcânicas de idades meso e neoproterozoicas, com blocos de embasamento de idade paleoproterozoica e alguns remanescentes do Arqueano, acompanhada de um importante plutonismo granítico (Angelim et al. 2006).

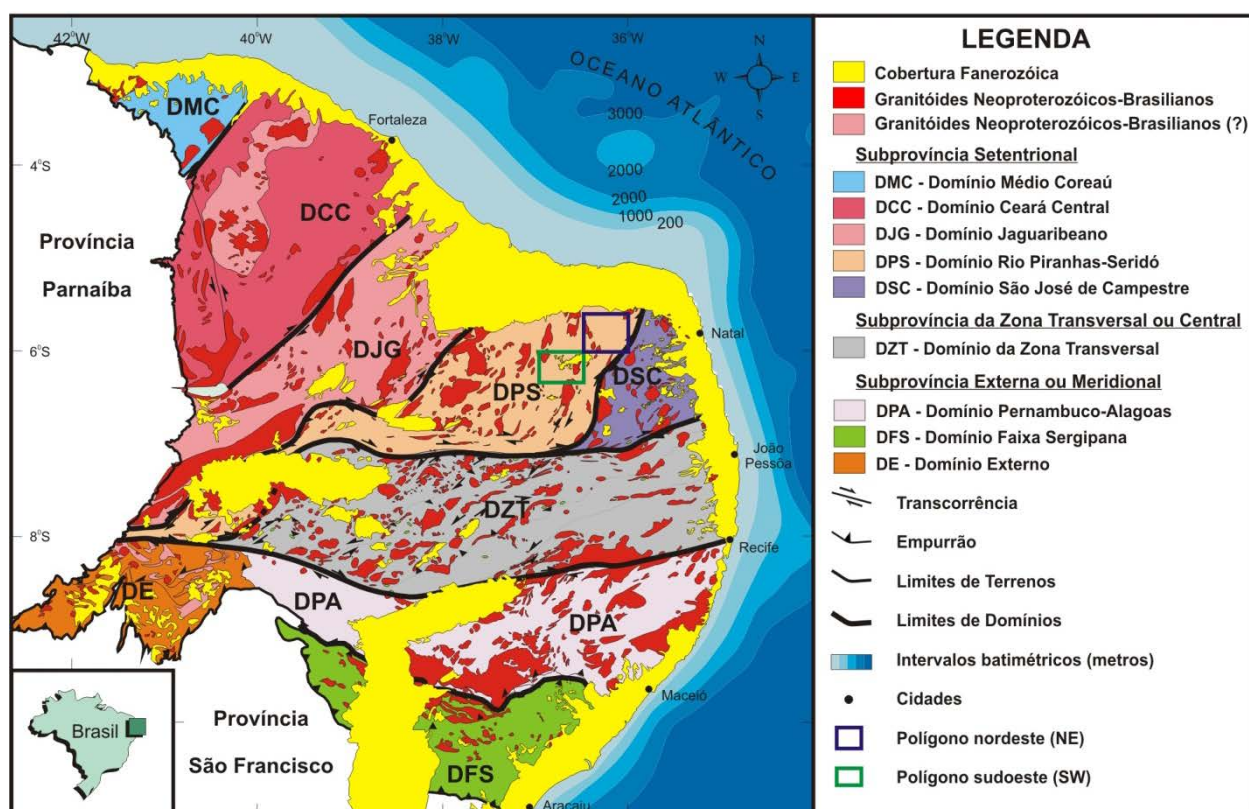


Figura 2.1 – Contexto das áreas de estudo na compartimentação tectônica da Província Borborema (Rodrigues et al. 2011) no conceito de subprovíncias de Delgado et al. (2003).

Delgado et al. (2003) subdividiu a Província Borborema em três segmentos tectônicos fundamentais, limitados por importantes zonas de cisalhamento brasileiras, denominadas de Subprovíncia Setentrional, Subprovíncia da Zona Transversal ou Central e Subprovíncia Externa ou Meridional (Figura 2.1). A Subprovíncia Setentrional compreende a porção situada a norte do Lineamento Patos. A Subprovíncia da Zona Transversal trata-se de um segmento crustal de direção E–W, limitado a norte e a oeste pelo Lineamento Patos, a sul pelo Lineamento Pernambuco e a leste pelas bacias costeiras. A Subprovíncia Externa ou Meridional compreende a porção situada ao sul do Lineamento Pernambuco. Cada um desses segmentos foi dividido ainda em domínios, terrenos ou faixas, com base no patrimônio litoestratigráfico, feições estruturais, dados geocronológicos e assinaturas geofísicas.

Toda essa compartimentação como domínios tectônicos foi bastante discutida nas últimas décadas permitindo a proposta de vários modelos. Almeida et al. (1976), Brito Neves (1983) e Santos et al. (1984) tiveram papel importante na delimitação dos domínios tectônicos maiores. Jardim de Sá (1994) retomou o conceito de Zona Transversal para o domínio geológico entre os grandes lineamentos Pernambuco e Patos, inicialmente definido por Ebert (1962). Delgado et al. (2003) descreve que o arcabouço tectônico foi baseado no conceito de terrenos ou domínios tectonoestratigráficos discutidos em Santos (1996) e na integração de vários modelos de compartimentação de Jardim de Sá (1994), Van Schmus et al. (1995), Brito Neves et al. (2000) e Santos et al. (2000). Santos (1996) considera que a Província Borborema foi formada pela aglutinação de grandes fragmentos de crostas durante as orogêneses Cariris Velhos (início do Neoproterozoico) e Brasileira (final do Neoproterozoico). A evolução dessa concepção incluiu ainda a contribuição de informações gravimétricas e magnéticas por Oliveira & Santos (1999), Oliveira et al. (2000) e Oliveira (2008). Campelo (1999) e Medeiros (2004) também usaram dados geofísicos, mas em regiões distintas, o primeiro a norte do Lineamento de Patos e o segundo no Domínio da Zona Transversal.

De todos os modelos de compartimentação da Província Borborema, será utilizada neste trabalho a denominação de Domínio Rio Piranhas – Seridó, proposta inicialmente por Angelim et al. (2006), para região onde estão localizadas as áreas de estudo representadas pelos polígonos sudoeste e nordeste (Figura 2.1), inseridas na Subprovíncia Setentrional.

2.1.2 – Domínio Rio Piranhas – Seridó

As áreas de estudo (figuras 2.1 e 2.2) estão situadas na porção leste do Domínio Rio Piranhas - Seridó (DPS). Segundo Angelim et al. (2006) o DPS corresponde a porção da Faixa Seridó de Jardim de Sá (1994) situada a oeste da zona de cisalhamento Picuí-João Câmara, ao Terreno Seridó de Campelo (1999) e aos terrenos Rio Piranhas e Faixa Seridó de Brito Neves et al. (2000). Está limitado tectonicamente a oeste pelo Domínio Jaguaribeano através da zona de cisalhamento Portalegre, considerada como uma sutura transcorrente/transformante brasileira, e a leste pelo Domínio São José do Campestre por meio da zona de cisalhamento Picuí-João Câmara. Compreende um embasamento, ora referido como Embasamento Rio Piranhas (ERP) e uma cobertura de rochas supracrustais correspondente à Faixa Seridó (FSE). Essas rochas são cortadas por corpos granitoides ediacaranos e rochas vulcânicas básicas relacionadas aos magmatismos Macau e Rio Ceará-Mirim. Na região ainda ocorrem às coberturas sedimentares cenozoicas.

O embasamento (ERP) das rochas supracrustais é reportado por Jardim de Sá (1994) como ortognaisses equigranulares ou *augen*, anfibolitos e rochas metavulcânicas e metassedimentares. Esses ortognaisses variam de gabro-diorítico a granítico, de quimismo cálcio-alcálico de alto potássio, com idade variando entre 2,25 e 2,15 Ga (Souza et al. 2007, Hollanda et al. 2011, Medeiros et al. 2012a), interpretados como derivados do manto enriquecido em um contexto de acreção crustal (Souza et al. 2007).

A Faixa Seridó corresponde às rochas supracrustais do Grupo Seridó, que é constituído por uma unidade basal formada principalmente por paragneisses, com intercalações de mármore e rochas calciossilicáticas (Formação Jucurutu), uma intermediária composta por quartzitos e metaconglomerados (Formação Equador) e uma superior essencialmente constituída por micaxistos (Formação Seridó) (Jardim de Sá & Salim 1980). Segundo Van Schmus et al. (2003) as datações U-Pb em zircões detríticos mostraram idades mínimas em torno de 650 Ma como provável idade para a deposição do Grupo Seridó. Hollanda et al. (2015) indicaram que a proveniência dos metapelitos no topo da sucessão metassedimentar que constitui o Grupo Seridó inclui uma população proeminente de zircões criogenianos com os grãos mais jovens datados entre 640 e 620 Ma. A deposição deste grupo teria cessado em 600 Ma, pela indicação de plutons graníticos intrusos nessas rochas.

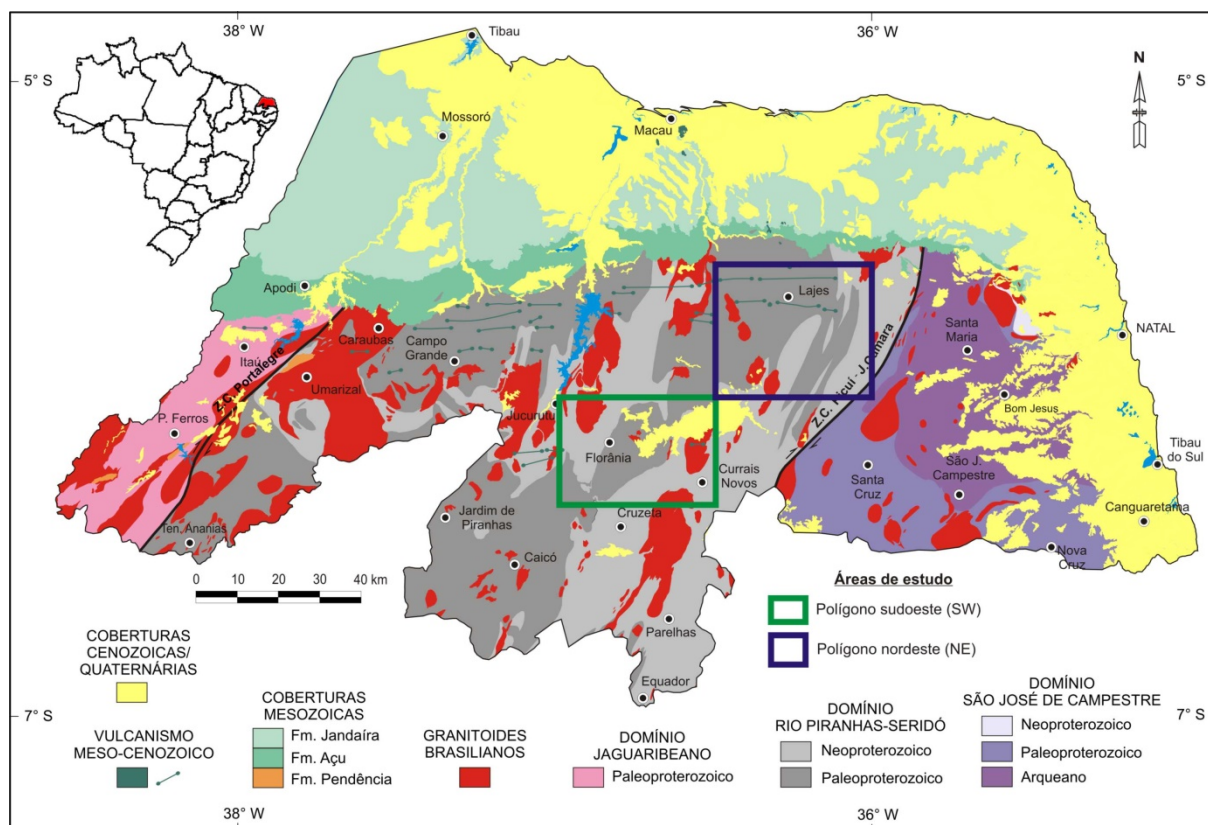


Figura 2.2 - Compartimentação tectônica do estado do Rio Grande do Norte (Medeiros et al. 2010), com a localização das áreas de estudo (polígonos sudoeste e nordeste).

O plutonismo edicariano é representado principalmente por corpos graníticos batolíticos de diferentes aspectos texturais e linhagens químicas com idades no intervalo de 630 – 542 Ma (Nascimento et al. 2008, 2015). Angelim et al. (2006) definiram os seguintes tipos graníticos: Os dominantes representados por granitos porfiríticos denominados como Suíte Intrusiva Itaporanga; Associados aos granitos porfiríticos uma suíte de rochas intermediárias a máficas, de composição predominantemente diorítica, que ocorrem principalmente como enclaves e mais raramente como corpos isolados, referidos como Suíte Intrusiva São João do Sabugi; Plútons granitoides de textura fina a média, equigranulares, predominantemente biotita granitos, conhecidos como Suíte Intrusiva Dona Inês.

O magmatismo Meso-cenozoico é representado por diques de diabásio e basalto de direção preferencial E-W (Rio Ceará-Mirim) e derrames e plugs basálticos (Macau). As coberturas sedimentares correspondem aos sedimentos siliciclásticos do Paleógeno-Neógeno da Formação Serra do Martins e pelos sedimentos inconsolidados do Neógeno.

O arcabouço estrutural do Domínio Rio-Piranhas-Seridó inclui uma sucessão de três eventos deformacionais: D1, D2 e D3 (Ries & Shackleton 1977, Salim et al. 1979, Jardim de Sá 1994). O primeiro evento deformacional (D1) corresponde ao bandamento gnáissico migmatítico, que gerou uma superfície S1 restritas às rochas do embasamento (ERP), podendo ou não ser obliteradas pelos eventos posteriores. O segundo evento deformacional (D2) é relacionado a uma tectônica contracional que evolui para um contexto de empurrões, gerando megadobramentos recumbentes que em alguns locais provocaram inversões estratigráficas, com introdução de fatias alóctones do embasamento no interior dos metassedimentos do Grupo Seridó. D3 é caracterizado como um intenso evento deformacional que provocou retrabalhamento crustal e gerou um complexo de zonas de cisalhamento transcorrentes com orientação principal NE. Este evento está relacionado à Orogênese Brasileira. Na porção central da Faixa Seridó o regime deformacional transcorrente concentra uma cinemática transpressiva caracterizada por estruturas em flor (Jardim de Sá 1994, Archanjo et al. 1992, 2002), enquanto que no leste, o estilo tectônico predominantemente transtensional é dado pelo desenvolvimento e expressivas zonas de cisalhamento distensionais (Jardim de Sá et al. 1993, 1999).

2.1.3 – Formações ferríferas no Rio Grande do Norte

Em Angelim et al. (2006) estão reportadas apenas 12 ocorrências de rochas ferríferas para todo o estado do Rio Grande do Norte, quantidade que realmente era reconhecida até esse período e para toda essa região. Os domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre representam a extensão territorial onde está a maior parte das rochas pré-cambrianas do Rio Grande do Norte. Nessas duas compartimentações tectônicas aparecem diversas ocorrências de rochas ferríferas, que tem sido cartografadas, após Angelim et al. (2006), em projetos executados pela CPRM, mapeamentos geológicos em escala regional (1:100.000), relatórios de graduação e dissertações de mestrado desenvolvidas por instituições como a UFRN, UFPE e UNB.

No Domínio São José do Campestre (DSJC) as formações ferríferas bandadas (FFB's) estão incluídas nos metassedimentos supracrustais com mais de 3,45 Ga identificados em mapeamentos de detalhe realizados por Dantas et al. (2004). São rochas associadas à anfíbolitos, calcários, rochas cálcio-silicáticas e metassedimentos

aluminosos (sillimanita xistos). Figueiredo (2012) investigou as ocorrências de Formações Ferríferas (FF's) e carbonatos na porção sul do núcleo arqueano inserido no Domínio São José do Campestre (DSJC) (Figura 2.2). Esse autor estudou o significado geotectônico dessas rochas, através de suas identidades petrológicas, geoquímicas e isotópicas. Silva Filho (2012) fez a datação direta da sedimentação das FFB na porção norte do DSJC através do método Sm-Nd e a aplicação de geoquímica dos elementos maiores, menores, traços e terras raras, para o entendimento da origem e natureza da fonte do material que compõe as formações ferríferas. Em ambos os casos as FFB's são de idade arqueana e esses dois autores sugerem que o oceano nesse período apresentou diversas fumarolas atuando por um longo período de tempo, ocorrendo portanto mudanças durante sua atividade. Roig & Dantas (2013a, 2013b) cartografaram as FFB's na escala de 1:100.000. Recentemente, Abrahão Filho (2016) estudou rochas máficoultramáficas, metassomatitos e formações ferríferas bandadas no DSJC. Utilizou técnicas de química mineral, análises de rocha total, comportamentos de ETR e elementos traços, análises de U/Pb e razões isotópicas Sm-Nd para o entendimento do ambiente tectônico de deposição ou colocação dessas rochas, buscando a possibilidade de encontrar novos guias prospectivos para área.

No Domínio Rio Piranhas-Seridó está localizada a única mina de ferro em atividade (mina de Saquinho), porém a mina de Bonito, em Jucurutu era a ocorrência mais conhecida. Em Ferreira et al. (1977) apenas 6 ocorrências de ferro eram conhecidas em todo estado do Rio Grande do Norte, nos municípios de Barcelona, Ipueira, Jucurutu, Ouro Branco, Presidente Juscelino e São Rafael. A mina do Bonito em Jucurutu foi descrita por esses autores como uma lente encaixada em ortognaisse, com mais de 4 km de extensão, espessura em torno de 200m e teor de 37%. As outras ocorrências foram consideradas pouco expressivas.

Osório (1981) através da Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Rio Grande do Norte (CDM) realizou um trabalho bastante completo de avaliação do potencial das duas principais ocorrências, até os dias de hoje, de formação ferrífera no estado: Serra da Formiga no município de Cruzeta/RN e Pico do Bonito em Jucurutu/RN. Correspondem as minas de Bonito, hoje inativa, e Saquinho, que está em atividade de exploração. Em ambos os casos o autor considera que correspondem a ferro sedimentar de precipitação química depositado em bacias estreitas, com teores variando de itabirito pobre (<35%) até minério rico (>60%). Porém as reservas

calculadas naquele período não demonstraram interesse econômico para esses depósitos. Logo em seguida Hackspacher & Osório (1981) detalharam a geologia do minério de ferro bandado de Saquinho. Barbosa (2013) abordou dados geológicos, geoquímicos e tipológicos dos minérios de ferro da mina de Bonito, em Jucurutu/RN.

Relatórios de graduação (Pessoa 1986, Barbalho 1992, Costa 2012) nos municípios de Cruzeta, Lajes e São Tomé executados pela UFRN incluíram a cartografia, caracterização litológica e petrográfica de formações ferríferas, por vezes destacando as condições metamórficas e estruturais. Azevedo (2016) além de petrografia realizou estudo de litoquímica com um grupo de 09 amostras na região de Cruzeta e Florânia. Porém em mapeamentos geológicos mais regionais realizados nos últimos anos, apenas nas áreas de estudo (figuras 1.1 e 1.2), foco deste trabalho, realizaram o cadastro de 48 ocorrências de rochas ferríferas (Dantas et al. 2012, Costa & Dantas 2014), já citadas anteriormente no item 1.4 desta dissertação.

Os trabalhos mais detalhados são os mais recentes e consistem do uso de litoquímica de rocha e dados isotópicos, em alguns casos, para discutir a gênese e condições paleoambientais das rochas ferríferas no Domínio Rio Piranhas-Seridó (Campos 2011, Ferreira et al. 2015, Sial et al. 2015). Serão melhor discutidos no item 3.2 desta dissertação.

2.2 – Geologia Local

2.2.1 – Introdução

As ocorrências de rochas ferríferas na região central do Rio Grande do Norte correspondem em sua grande maioria a pequenos depósitos sem potencial econômico. Porém, nos últimos anos, alguns jazimentos tem sido explorados em algumas áreas do Estado, especialmente os que estão inseridos no Domínio Rio Piranhas – Seridó. As formações ferríferas ocorrem como intercalações decimétricas a algumas dezenas de metros em gnaisses da Formação Jucurutu, na base do Grupo Seridó. Menos frequentemente estão associadas às rochas metamáficas encaixadas em gnaisses do Complexo Caicó e possíveis rochas ortoderivadas.

Basicamente, nas regiões de estudo (Figura 2.2) é possível distinguir três tipos principais de rochas ferríferas:

- a) Ocorrências de formações ferríferas de provável origem sedimentar encaixadas na Formação Jucurutu;
- b) Formações ferríferas descontínuas encaixadas no embasamento paleoproterozoico; e
- c) Rochas metamáficas – metaultramáficas possivelmente relacionadas a depósitos (orto)magmáticos de óxidos de Fe-Ti.

Os dois primeiros casos (a, b) são alvo deste estudo. São rochas compostas basicamente de quartzo, óxidos e hidróxidos de ferro, anfibólios (cummingtonita-grunerita e tremolita-actinolita), de granulação fina a média e textura dominante granonematoblástica, homogêneas (Figura 2.3) ou com bandamento composicional (Figura 2.4). Apresentam geralmente teores de Fe_2O_3 variando entre 46 e 59% e de SiO_2 entre 33 e 50%.



Figura 2.3 – Aspecto textural de formação ferrífera granular em amostra de mão. (Localidade de Santa Polônia, Lajes/RN).



Figura 2.4 – Aspecto textural de formação ferrífera bandada em amostra de mão. (Localidade de Boqueirão, São Tomé/RN).

O último caso (c) foi estudado por Costa et al. (2014). Corresponde a um corpo de magnetitito associado à rocha ultramáfica, com poucos metros aflorante, exibindo teores de 73% de Fe_2O_3 e 17% de TiO_2 , composto de cristais de magnetita e ilmenita, além de lamelas de exsolução de ilmenita. Apenas uma ocorrência desse tipo foi identificada na área, porém é comum por toda a região, a presença de rochas metamáficas e metaultramáficas geralmente serpentinizadas e magnéticas, de granulação fina a média, compostas essencialmente de serpentina com textura fibrosa-lamelar, talco e minerais opacos disseminados, indicando a possibilidade da existência de mais ocorrências de magnetitito.

Os mapas geológicos simplificados das áreas nordeste (Figura 2.5) e sudoeste (Figura 2.6) foram baseados principalmente em Medeiros et al. (2012b), Costa & Dantas (2014) e Cavalcante et al. (2015a). Mostram a distribuição das rochas ferríferas no contexto da área de estudo. O refinamento na delimitação dessas rochas, além de dados de campo, foi realizado com o uso de imagens aerogeofísicas e de satélite.

2.2.2 – Cartografia de rochas ferríferas com uso de sensores remotos

Para os trabalhos de cartografia geológica realizada nas duas áreas de trabalho, durante as atividades de campo desenvolvidas nas áreas sudoeste e nordeste, a interpretação de imagens aerogeofísicas e imagens de satélite foram essenciais para delimitação de alvos magnéticos potenciais em mapas preliminares de campo. No primeiro caso as imagens aerogeofísicas serviram principalmente para prospecção de rochas ferríferas, porém em menor importância para melhorar a delimitação dessas ocorrências minerais. Em contrapartida, as imagens de satélite foram mais eficientes para este fim, com a utilização de processamentos digitais de imagens, especialmente para os corpos rochosos mais expressivos (mina de Saquinho).

Os dados aerogeofísicos (aeromagnetometria e aerogamaespectrometria) utilizados são provenientes do Projeto Aerogeofísico Paraíba - Rio Grande do Norte e Pernambuco - Paraíba (CPRM 2009). Os parâmetros foram: Altura do vôo de 100 m; Direção das linhas de vôo (LV) N-S; Espaçamento das linhas de vôo (LV) 500 m; Direção das linhas de controle (LC) E-W; Espaçamento das linhas de controle (LC) 10 km. Esses dados foram processados em Oliveira (2015) e geraram as imagens aerogeofísicas apresentadas como encartes na Folha Currais Novos (Medeiros et al. 2012b). A mesma metodologia foi utilizada para as imagens apresentadas como encartes na Folha Lajes (Costa & Dantas 2014, respectivamente). Em ambos os casos incluem a imagem do campo magnético total, da primeira derivada vertical do campo magnético total e a imagem da fusão radiométrica ternária dos canais de potássio, equivalente tório (eTh) e equivalente urânio (eU).

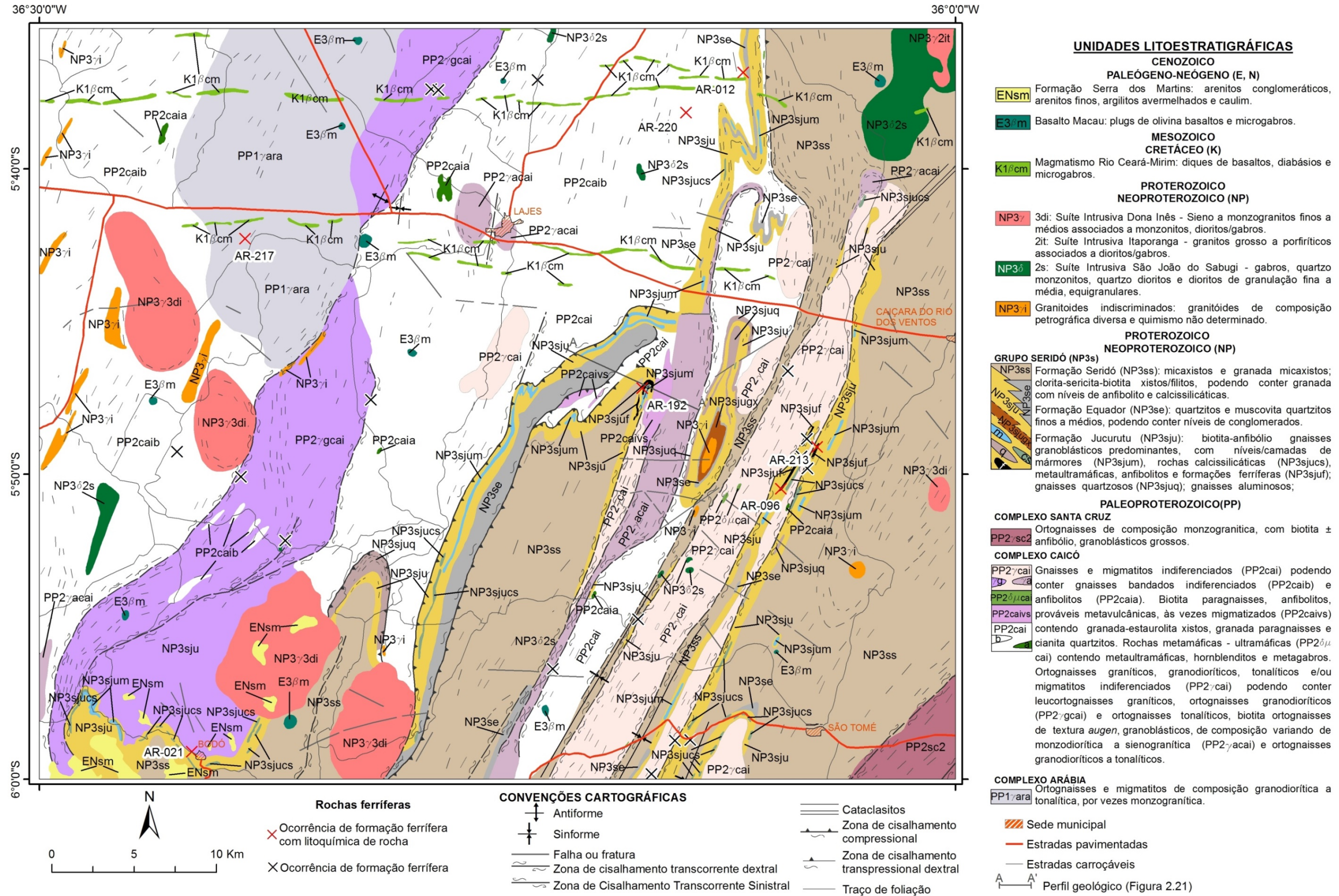
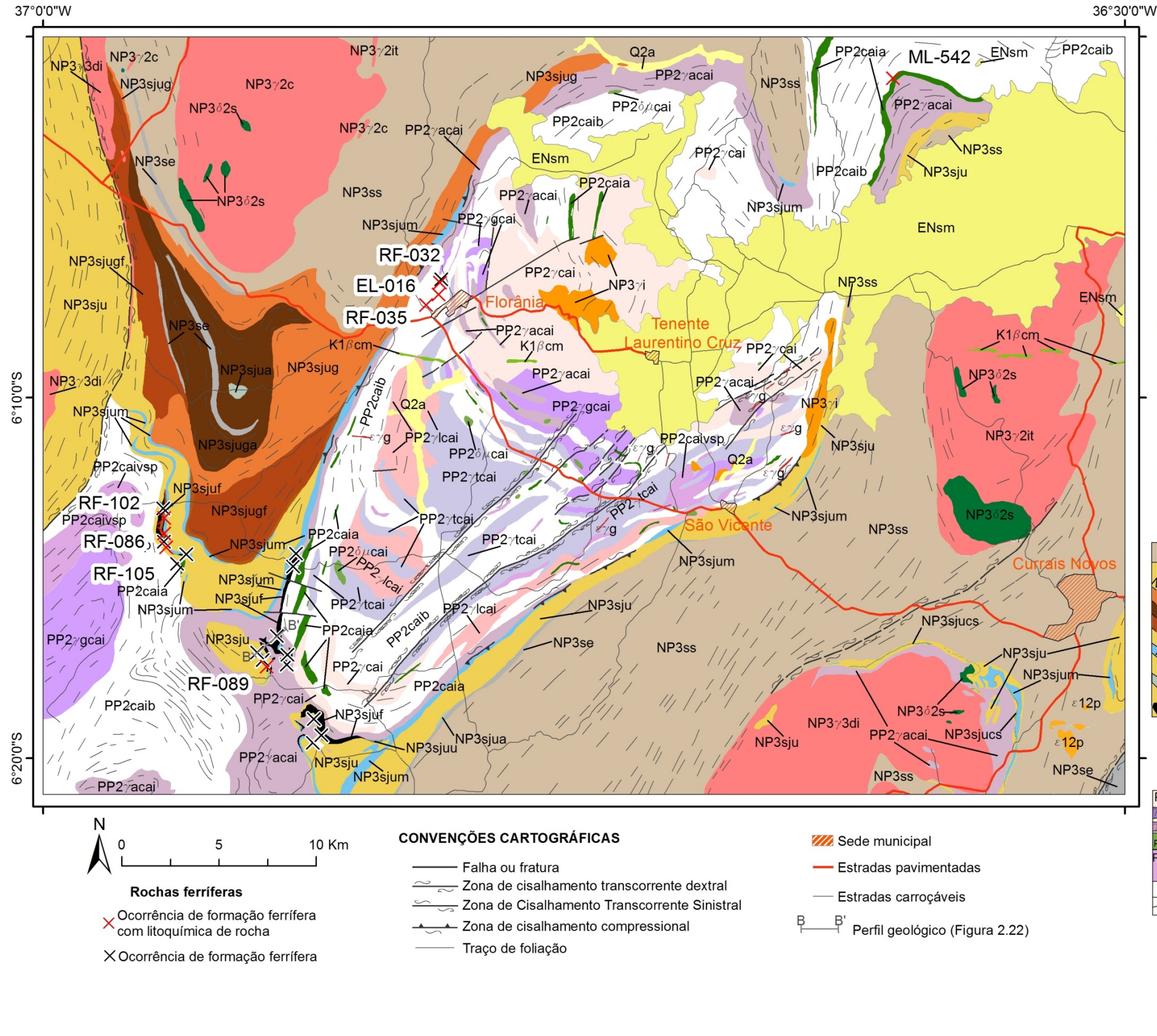


Figura 2.5 – Mapa geológico simplificado da área de estudo nordeste com a localização das ocorrências minerais de formação ferrífera e os pontos de ocorrência mineral com coleta de amostra para litoquímica (compilado de Costa & Dantas 2014, Dantas e Costa 2014, Cavalcante et al. 2015a). Datum WGS84, Zona 24-Sul.



UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

- CENOZOICO**
QUATERNÁRIO (Q)
 Q2a Depósitos aluvionares: areias, cascalhos e argilas.
- PALEÓGENO-NEÓGENO (E, N)**
 ENsm Formação Serra dos Martins: arenitos conglomeráticos, arenitos finos, argilitos avermelhados e caulim.
 E3m Basalto Macau: plugs de olivina basaltos e microgabros.
- MESOZOICO**
CRETÁCEO (K)
 K1βcm Magmatismo Rio Ceará-Mirim: diques de basaltos, diabásios e microgabros.
- PALEOZOICO**
CAMBRIANO (ε)
 ε12p Corpos e diques pegmatíticos.
 ε7g Corpos e diques de sienogranitos e granodioritos.
- PROTEROZOICO**
NEOPROTEROZOICO (NP)
 NP3γ 3di: Suíte Intrusiva Dona Inês - Sieno a monzogranitos finos a médios associados a monzonitos, dioritos/gabros.
 2it: Suíte Intrusiva Itaporanga - granitos grosso a porfíricos associados a dioritos/gabros.
 2c: Suíte Intrusiva Conceição - granitos, granodioritos e tonalitos equigranulares finos a médios.
 NP3δ 2s: Suíte Intrusiva São João do Sabugi - gabros, quartzo monzonitos, quartzo dioritos e dioritos de granulação fina a média, equigranulares.
 NP3ι Granitoides indiscriminados: granitoides de composição petrográfica diversa e quimismo não determinado.
- PROTEROZOICO**
NEOPROTEROZOICO (NP)
GRUPO SERIDÓ (NP3s)
 NP3ss Formação Seridó: micaxistos e granada micaxistos (NP3ss); clorita-sericita-biotita xistos/filitos, podendo conter granada; com níveis de anfibolito e calcissilicáticas.
 NP3se Formação Equador: quartzitos e muscovita quartzitos lepidogranoblásticos finos a médios de coloração cinza claro a creme (NP3se), podendo conter níveis de conglomerados.
 NP3sju Formação Jucurutu: biotita-anfibólio gnaisses granoblásticos (NP3sju) predominantes, com níveis/camadas de mármore (NP3sjum), rochas calcissilicáticas (NP3sjucs), metaultramáficas (NP3sjuu), anfibolitos (NP3sjua) e formações ferríferas (NP3sjuf); gnaisses quartzosos (NP3sjug); gnaisses aluminosos (NP3sjuga); muscovita-biotita gnaisses/xistos e gnaisses feldspáticos (NP3sjugf).
- PALEOPROTEROZOICO (PP)**
COMPLEXO CAICÓ
 PP2γcai Gnaisses e migmatitos indiferenciados (PP2cai) podendo conter gnaisses bandados indiferenciados (PP2caib) e anfibolitos (PP2caia) Biotita paragneisses, anfibolitos, prováveis metavulcânicas, às vezes migmatizados (PP2caivs) contendo granada-estaurólita xistos, granada paragneisses (PP2caivsp) e cianita quartzitos. Rochas metamáficas - ultramáficas (PP2δμcai) contendo metaultramáficas, hornblenditos e metagabros. Ortogneisses graníticos, granodioríticos, tonalíticos e/ou migmatitos indiferenciados (PP2γcai) podendo conter leucortogneisses graníticos (PP2γlcai), ortogneisses granodioríticos (PP2γgcai) e ortogneisses tonalíticos (PP2γtcai), biotita ortogneisses de textura augen, granoblásticos, de composição variando de monzodiorítica a sienogranítica (PP2γacai), ortogneisses granodioríticos; ortogneisses tonalíticos.

Figura 2.6 – Mapa geológico simplificado da área de estudo sudoeste com a localização das ocorrências minerais de formação ferrífera e os pontos de ocorrência mineral com coleta de amostra para litoquímica (compilado de Medeiros et al. 2012b, Cavalcante et al. 2015a). Datum WGS84, Zona 24-Sul.

Para fins de prospecção mineral as melhores interpretações foram obtidas com as imagens de aeromagnetometria (anomalia do campo magnético total residual e sinal analítico da anomalia do campo magnético total residual) (figuras 2.7 e 2.8, respectivamente). Corroboradas com dados de campo (localização de ocorrências minerais) permitiram delimitar três tipos de alvos magnéticos e conseqüentemente identificar rochas potencialmente ferríferas. É possível associar estas rochas com a forma de anomalias magnéticas (Figura 2.9).

Parte das anomalias magnéticas definidas e apresentadas na Figura 2.9 foi visitada no campo. Aquelas que não apresentam ocorrência de rocha ferrífera associada, ainda são alvos magnéticos que precisam ser checados. Conseqüentemente, outras ocorrências minerais ainda podem ser reconhecidas nas áreas de trabalho.

Na área de estudo do polígono nordeste (figuras 2.7, 2.8 e 2.9), as anomalias aeromagnéticas alongadas de direção NNE-SSW no quadrante SE representam as formações ferríferas associadas aos metassedimentos da Formação Jucurutu. As anomalias normalmente lenticulares, de direção NE-SW na parte central e oeste, normalmente são rochas metamáficas encaixadas em ortognaisses paleoproterozoicos. Por fim, as anomalias magnéticas menos expressivas, circulares ou elípticas, especialmente no quadrante SE, trata das rochas metamáficas e metaultramáficas, que não são alvo desse estudo.

Na área de estudo do polígono sudoeste (figuras 2.7, 2.8 e 2.9), as anomalias associadas às formações ferríferas encaixadas nos metassedimentos da Formação Jucurutu são elípticas e alongadas na direção NNW-SSE ou NE-SW, enquanto as metamáficas encaixadas em gnaisses paleoproterozoicos são lenticulares. As estruturas regionais formam grandes lineamentos regionais, de extensões quilométricas e são facilmente separadas das ocorrências de rochas ferríferas, que são mais restritas.

É importante ressaltar que as rochas do vulcanismo máfico do Basalto Macau e Magmatismo Rio Ceará-Mirim, além dos corpos rochosos da Suíte intrusiva São João do Sabugi, representada por gabros, dioritos e monzonitos, foram devidamente separadas de todas as áreas potenciais identificadas para rochas ferríferas (Figura 2.9). Essas rochas também são fonte de anomalias magnéticas positivas.

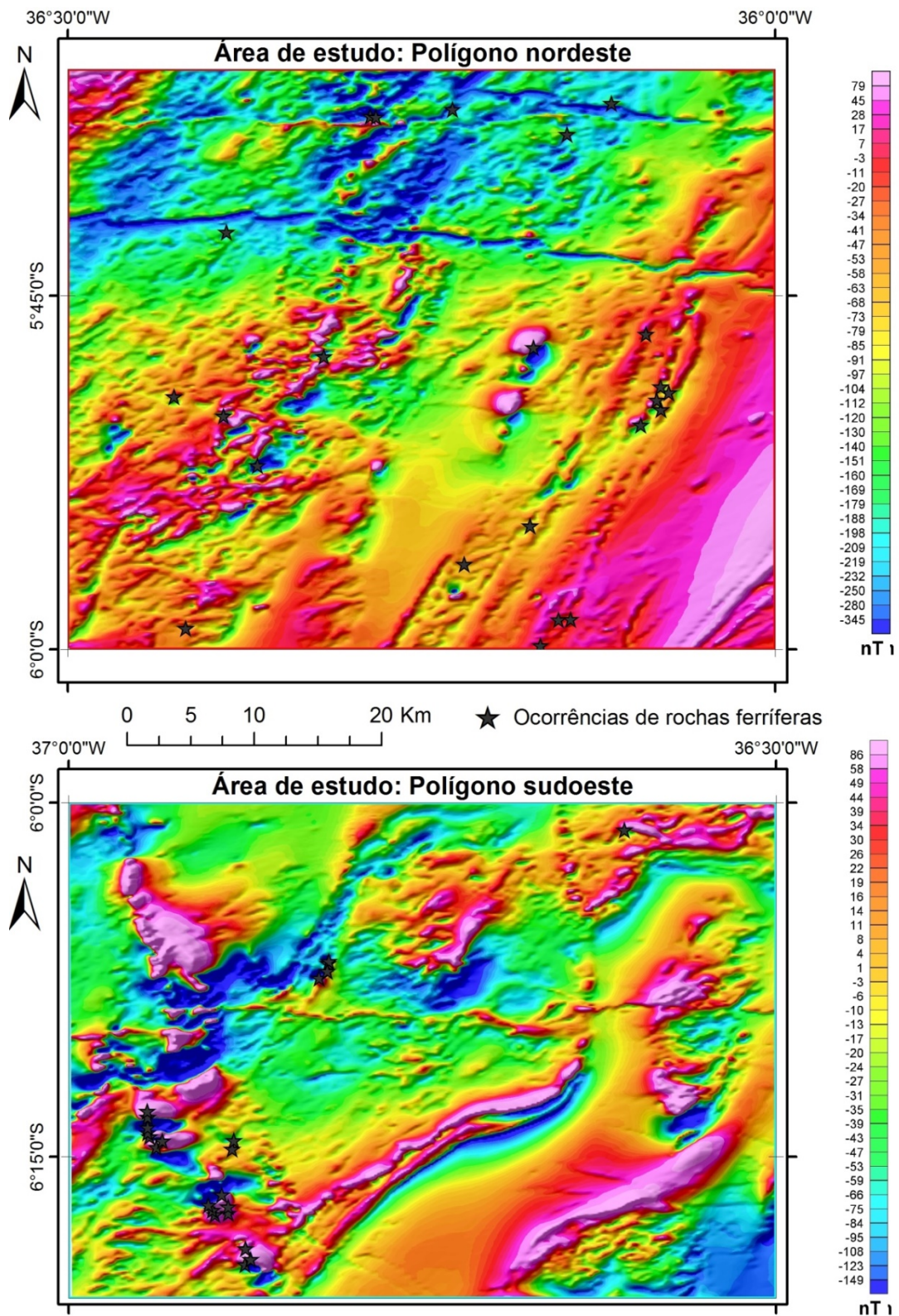


Figura 2.7 – Imagens aerogeofísicas de intensidade magnética total anômala (Medeiros et al. 2012b e Costa & Dantas 2014) utilizadas para delimitação de alvos magnéticos potenciais para ocorrências de rochas ferríferas.

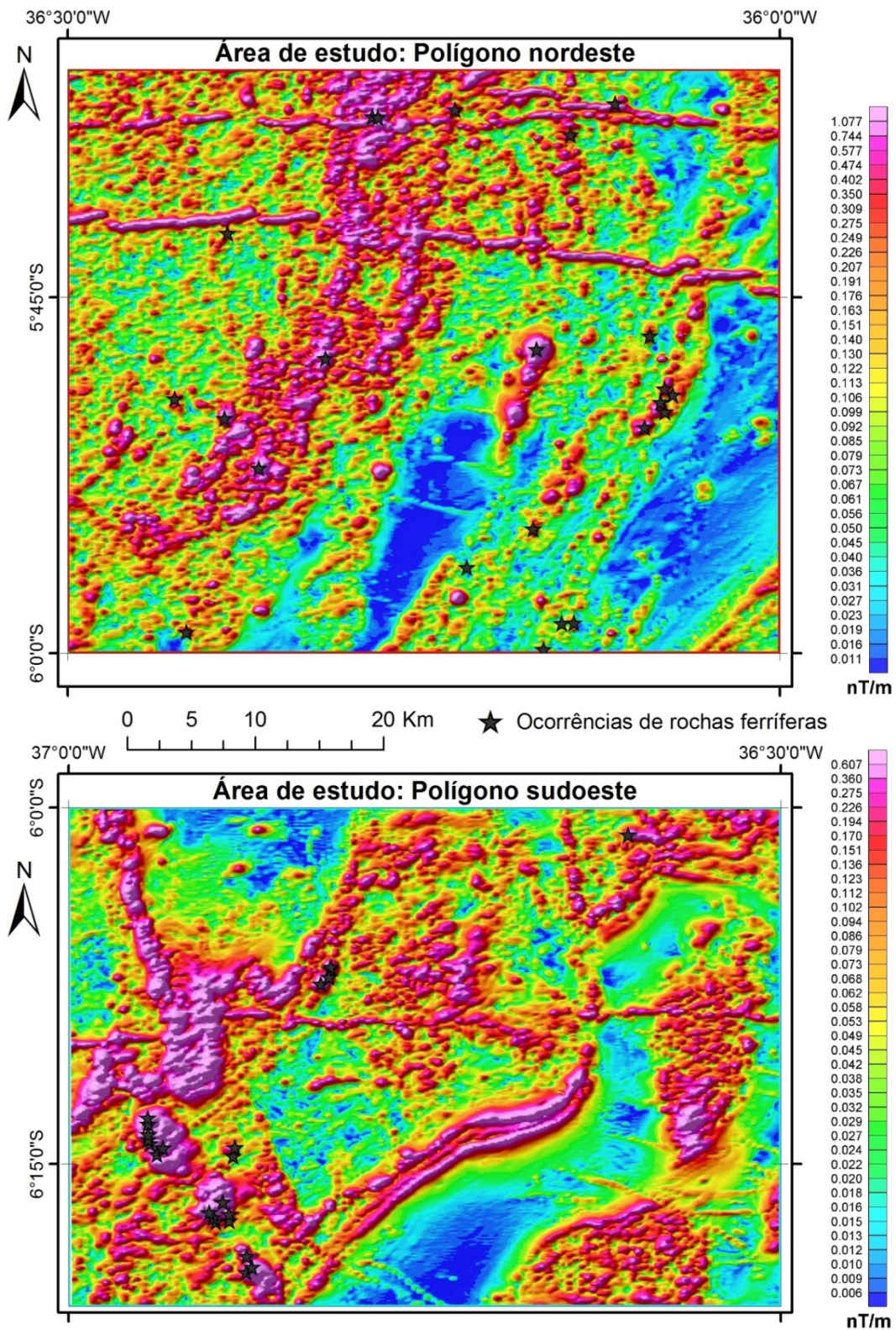


Figura 2.8 – Imagens aerogeofísicas do sinal analítico da anomalia do campo magnético total residual (Medeiros et al. 2012b e Costa & Dantas 2014) utilizadas para delimitação de alvos magnéticos potenciais para ocorrências de rochas ferríferas.

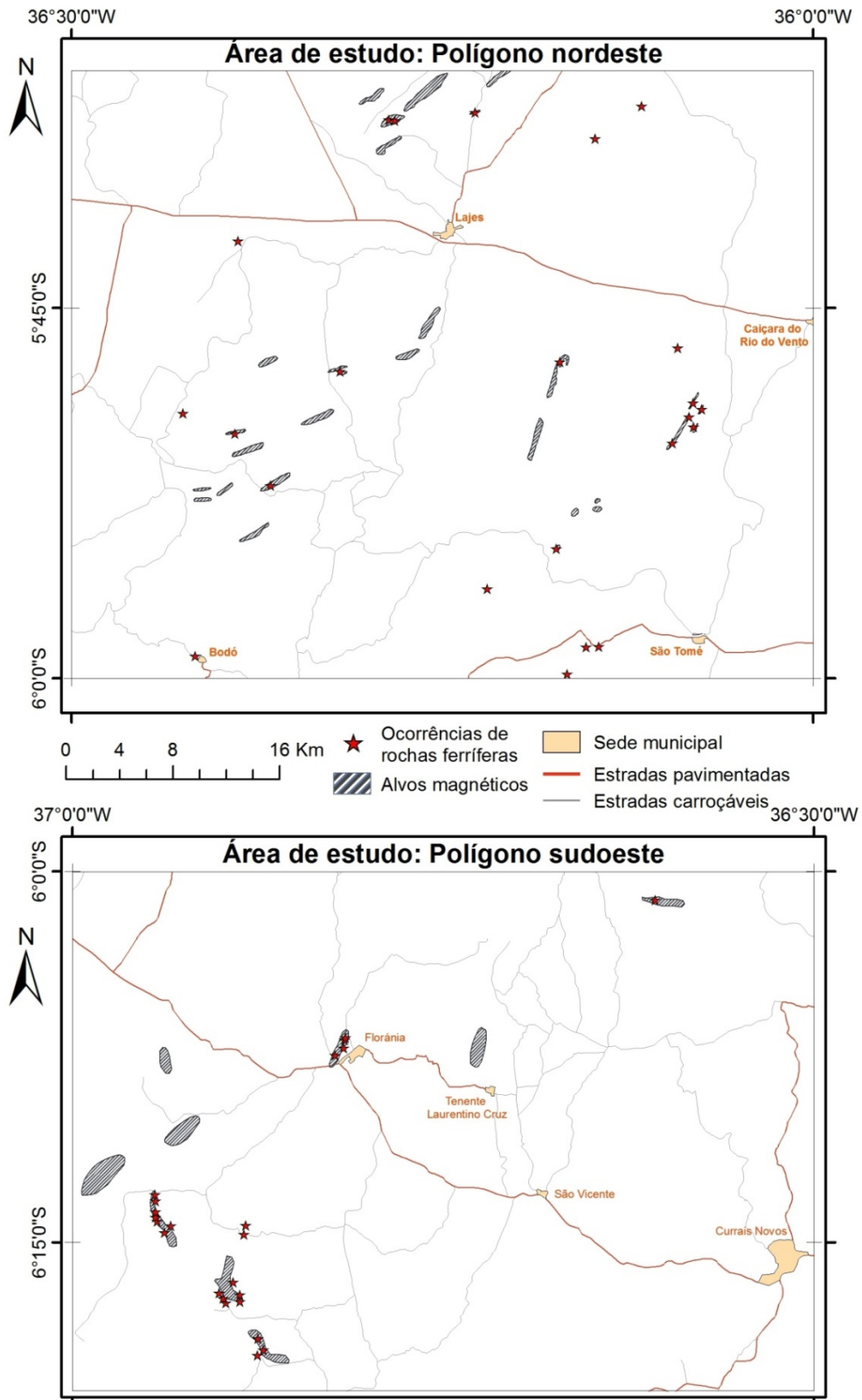


Figura 2.9 – Alvos magnéticos potenciais para ocorrências de rochas ferríferas delimitados pelo uso de imagens aeromagnéticas nas áreas de estudo dos polígonos nordeste e sudoeste.

A imagem de satélite foi utilizada apenas na região da mina de Saquinho. As exposições de colúvio e alguns afloramentos de formações ferríferas são os mais expressivos de toda Faixa Seridó. Comumente correspondem a concentrações de blocos centimétricos a decimétricos de rocha, espalhadas por áreas de dezenas a centenas de metros. Desta maneira é possível utilizar as imagens LANDSAT com sua resolução espacial de 30m. Porém o mais importante nesse caso é que em campo, o solo do entorno onde estão às rochas encaixantes, apresenta bastante contraste, especialmente quando estão em contato com faixas de mármore.

As imagens escolhidas foram obtidas gratuitamente para download na web no site da USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Optou-se pelo uso do sensor passivo ETM+ do satélite Landsat 7, cena 215/064, de 11 de junho de 2002. A cena original foi recortada nos limites das coordenadas UTM E 720 km e 744 Km e UTM N 9320 km e 9296 km da Zona 24 Sul, Datum WGS84, na porção sudoeste da área de estudo no polígono sudoeste.

O pré-processamento através das estatísticas de imagens (matriz de correlação e matriz de autovetores das componentes principais para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) e os processamentos digitais escolhidos para realce das feições nas imagens (composição colorida RGB, transformação IHS, sistemas híbridos HRGB e RGBI, operações aritméticas – razão de bandas, uso do índice de óxido de ferro – razão da banda 3 com banda 2, uso das principais componentes – PC's) permitiu gerar cinco imagens com os melhores resultados para interpretação visual. Três delas estão representadas na Figura 2.10.

Todas as imagens tratadas tiveram a participação da banda 3 ou da banda 4, ou ainda de ambas. A importância da banda 3 reside na maior reflectância de óxidos e hidróxidos de ferro nessa faixa do espectro eletromagnético (visível), como também a banda 4, que também é fortemente influenciada pela vegetação.

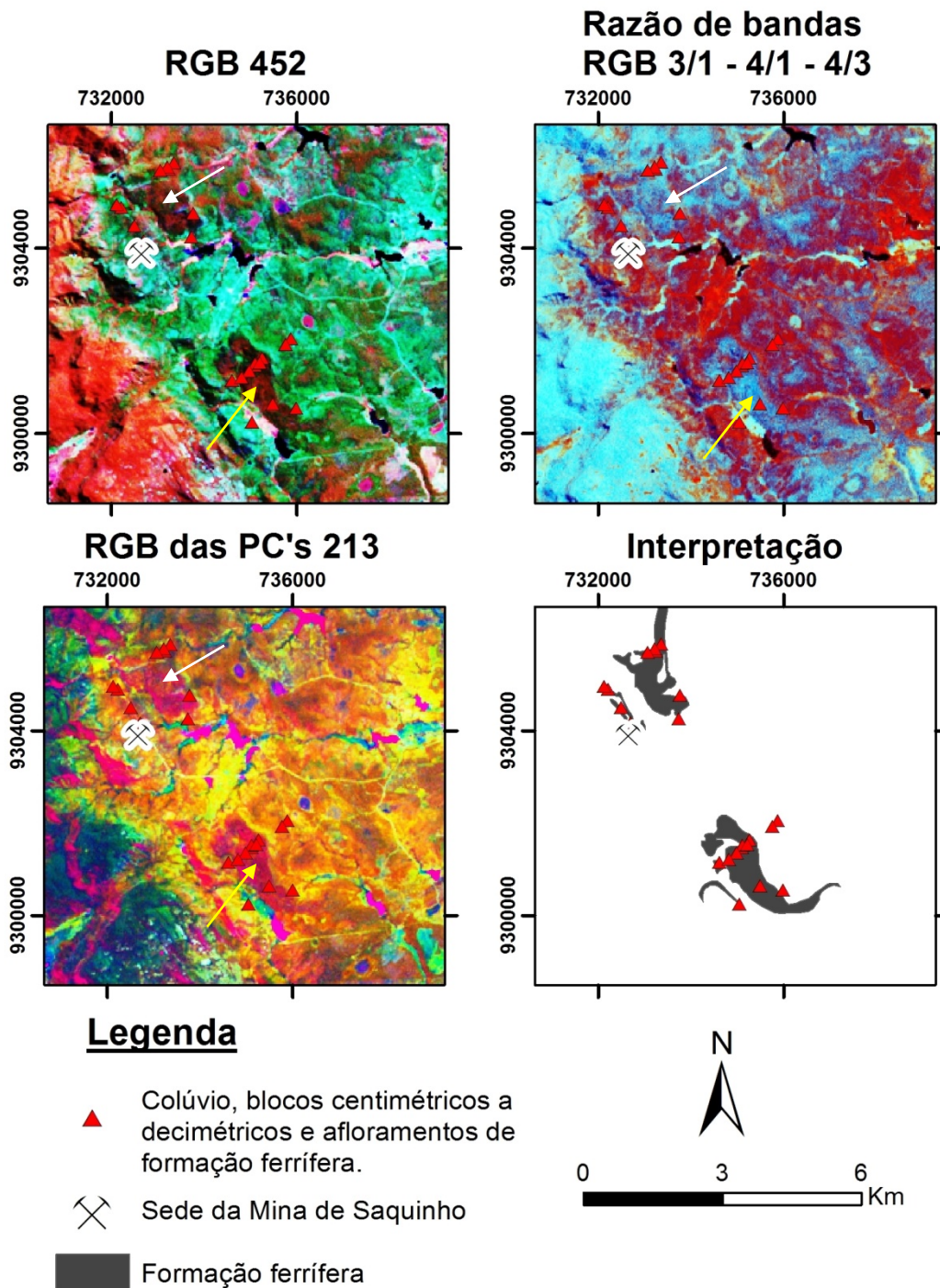


Figura 2.10 – Detalhe de algumas das imagens processadas no entorno da mina de Saquinho com melhores resultados apresentados para ocorrência de rochas ferríferas e interpretação da cartografia das formações ferríferas. Destaque para os setores de Saquinho e Saco Seco (indicado pelas setas brancas e amarelas, respectivamente).

Analisando o pacote das cinco imagens citadas anteriormente, claramente percebe-se a dificuldade de separar a vegetação das áreas com maior concentração de óxidos e hidróxidos de ferro. Na área de estudo, dominada por rochas metamórficas,

percebe-se com facilidade a presença de estruturas lineares dúcteis e a presença de sombreamento em áreas de relevo mais acidentado. A textura de áreas mais planas também contrasta com áreas de relevo mais acidentado. Para as rochas ferríferas na área da mina de Saquinho, alguns produtos de imagens processadas mostraram bons resultados nos setores Saquinho e Saco Seco (Figura 2.10 – setas brancas e amarelas, respectivamente). Áreas com rochas ferríferas normalmente apresentam cores muito parecidas com áreas de cobertura vegetal; porém, nos cinco produtos citados, foi possível perceber diferença nas tonalidades dessas cores próximas, normalmente com textura mais rugosa e cores levemente em tons mais escuros. Enquanto que áreas com maior cobertura vegetal tem coloração mais clara e textura normalmente um pouco menos rugosa. Os corpos rochosos tem formatos alongados, por vezes elipsoidal, como dobras suaves a abertas.

2.2.3 – Estratigrafia e geologia estrutural das áreas de estudo

As unidades pré-cambrianas nas áreas de estudo fazem parte do Domínio Rio Piranhas – Seridó e uma pequena área, no extremo sudeste do polígono nordeste, do Domínio São José do Campestre. Serão descritas em ordem cronológica. A litoestratigrafia foi baseada principalmente nos trabalhos de Medeiros & Dantas (2015), Medeiros et al. (2012b) e Costa & Dantas (2014). Os mapas simplificados das áreas de estudo podem ser observados nas figuras 2.5 e 2.6.

No Domínio Rio Piranhas-Seridó, a unidade mais antiga é o Complexo Arábia (PP1 γ ara), restrito apenas a porção noroeste da área de estudo, no polígono nordeste. Nos trabalhos de cartografia geológica realizados por Costa & Dantas (2014), as rochas do Complexo Arábia foram descritas como ortogneisses e gnaisses migmatíticos de composição granodiorítica a tonalítica, por vezes monzogranítica (PP1 γ ara), contendo lentes de anfibólito. As rochas do Complexo Arábia foram individualizadas e separadas das rochas pertencentes ao Complexo Caicó a partir de dados geocronológicos, que evidenciaram uma idade de 2.456 Ga para essa unidade (2.456 \pm 4.2 Ma com MSWD 2.0 – SHIRIMP, U/Pb em zircão) (Costa et al. 2015a).

As rochas do Complexo Santa Cruz (PP2 γ sc2) ocorrem no Domínio São José do Campestre. São biotita ortogneisses de composição monzogranítica aflorantes em uma pequena área na porção extremo sudeste do polígono nordeste.

O Complexo Caicó corresponde a todo o embasamento paleoproterozoico do restante das duas áreas de estudo. No polígono nordeste ocupa a maior extensão territorial, em relação a todas as outras unidades, enquanto no polígono sudoeste ocupa principalmente a parte central, extremo nordeste e sudoeste dessa área de estudo. É representado por vários litotipos, sendo eles: uma sequência de gnaisses e migmatitos indivisos (PP2cai), incluindo gnaisses bandados (PP2caib) e anfibolitos (PP2caia); uma unidade metavulcanossedimentar (PP2caivs) contendo xistos/paragnaisses (PP2caivsp) e quartzitos; rochas ortoderivadas de composição variada, desde metatonalitos à metagranitos, por vezes migmatizados (PP2 γ cai), ortognaisses graníticos a granodioríticos (PP2 γ gcai) (Figura 2.11), ortognaisses tonalíticos (PP2 γ tcai), leucortognaisses graníticos (PP2 γ lcai) e *augen* gnaisses (PP2 γ acai). Associado ao magmatismo deste complexo também é cartografada uma unidade de rochas metamáficas-metaultramáficas (PP2 $\delta\mu$ cai). No polígono sudoeste, as rochas do Complexo Caicó situadas entre as cidades de São Vicente a Florânia (RN), descritas por Dantas (1988), formam uma estrutura elipsoidal e dômica, orientada na direção principal regional NNE-SSW. Em Medeiros & Dantas (2015) é referida como Núcleo São Vicente-Florânia.

A unidade indivisa PP2cai corresponde as regiões onde existe uma grande variedade de litotipos (ortognaisses, metavulcanossedimentares, metamáfica-metaultramáficas, etc.), geralmente migmatizados. O Complexo Caicó apresenta idades variando de 2,25 a 2,10 Ga, considerando as idades U/Pb em zircão obtidas por Hackspacher et al. (1990), Legrand et al. (1991), Dantas (1992) e Souza et al. (2016) em metaplutônicas deste complexo.

A unidade das metamáficas-metaultramáficas (PP2 $\delta\mu$ cai) é representada por metagabros/metadioritos, metahornblenditos e metaultramáficas serpentinizadas (Figura 2.12). Distribuem-se na forma de corpos elipsoidais alongados, cartografados com maior frequência em uma faixa com direção nordeste, entre as localidades de Ingá, Bonfim e Fazenda Santa Izabel, no polígono nordeste, limite entre os xistos Seridó (NP3ss) e os ortognaisses do Complexo Caicó (PP2 γ cai). No polígono de estudo sudoeste foram cartografadas por Medeiros & Dantas (2015) na porção central e sul do Núcleo São Vicente-Florânia. Nas rochas desta unidade também são

observadas metaultramáficas representadas por corpos lenticulares de serpentina-talco xistos e clorita-actinolita xistos.

Os augen gnaiesses (PP2 γ acai) (Figura 2.13) foram considerados como uma suíte calcioalcalina por Costa et al. (2015b). São representados por biotita *augen* gnaiesses e ortognaisses grossos, inequigranulares, de composição variando predominantemente entre monzogranítica a granodiorítica, As condições metamórficas deste litotipo atingiram a fácies anfibolito superior, com retrometamorfismo para a fácies xisto verde. Os dados geocronológicos dessa rocha, obtidos por esses autores, revelam uma idade de 2.234 ± 7.3 Ma para um anfibólio biotita *augen* gnaisse de coloração cinza e composição monzogranítica, aflorante a noroeste de Lajes/RN. Esta idade permite associar esta rocha ao período riaciano e correlacioná-la ao Complexo Caicó. Em Medeiros et. al (2012a) duas datações U-Pb em zircão (ICP-MS-LA) forneceram idades (intercepto superior) de 2.252 ± 17 Ma (MSWD = 1,8) e de 2.171 ± 20 Ma (MSWD = 0,55) para estas rochas na área de estudo do polígono sudoeste.



Figura 2.11 – Ortognaisse de composição granítica migmatizado. (Caiçara do Rio do Vento/RN).



Figura 2.12 – Detalhe da metaultramáfica serpentinizada, localizada a 1,2 km a sudeste da mina Bonfim (Lajes/RN).

O Grupo Seridó corresponde às rochas metasupracrustais sobrepostas ao embasamento representado principalmente pelo Complexo Caicó. No presente trabalho o modelo estratigráfico utilizada para o Grupo Seridó será a proposta sugerida por Jardim de Sá & Salim (1980) e Jardim de Sá (1984). A geologia do Grupo Seridó é composta de paragneisses basais, com intercalações de mármores, calcissilicáticas, micaxistos, metavulcânicas e formações ferríferas correlacionadas a Formação Jucurutu, metaconglomerados e quartzitos pertencentes Formação Equador e em

posição intermediária e no topo da sequência temos micaxistos feldspáticos e aluminosos, correlacionados a Formação Seridó.

As rochas da Formação Jucurutu afloram principalmente nas porções sul e leste da área de estudo no polígono nordeste, em geral bordejando nos contatos entre os metassedimentos do Grupo Seridó e os gnaisses do embasamento. No polígono de estudo sudoeste afloram principalmente no extremo noroeste. É constituída predominantemente por biotita gnaisses podendo conter anfibólio (NP3sju) (Figura 2.14), com níveis/camadas de mármore (NP3sjum) (Figura 2.14) de extensões métricas a quilométricas, além de intercalações de rochas calcissilicáticas (NP3sjucs) (Figura 2.14), metaultramáficas (NP3sjuu), anfibolitos (NP3sjua), quartzitos (NP3sjuq), e formações ferríferas (NP3sjuf). Na porção mais basal dos paragneisses da Formação Jucurutu também foram cartografadas lentes de rochas metaultramáficas (NP3sjuu). Na área do polígono sudoeste Nascimento e Medeiros (2008) dividiram ainda a Formação Jucurutu em outras quatro litofácies: gnaisses quartzosos (NP3sjug), gnaisses aluminosos (NP3sjuga), muscovita-biotita gnaisses/xistos (NP3sjugx) e gnaisses feldspáticos (NP3sjugf), por vezes havendo interdigitação entre elas.



Figura 2.13 - Aspecto de campo dos *augen* gnaisses do Complexo Caicó a noroeste da cidade de Lajes/RN.

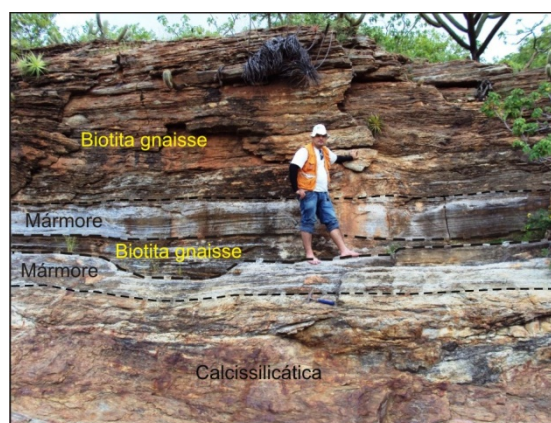


Figura 2.14 – Afloramento com intercalação de biotitas gnaisse com lentes de mármore e rochas calcissilicáticas (Formação Jucurutu), no leito do riacho Dois Rios, em Cafucá (Bodó/RN).

As rochas das formações ferríferas bandadas (NP3sjuf) foram cartografadas espacialmente próximo/associadas aos mármore (NP3sjum), rochas metaultramáficas (NP3sjuu) e rochas calcissilicáticas (NP3sjucs) e por vezes a níveis de espessuras que variam de centimétricas a métricas de gnaisses quartzosos e quartzitos, pertencentes as porções basais da Formação Jucurutu. Estas formações ferríferas se apresentam

bandadas (milimétricas a centimétricas) com faixas ricas em quartzo e outras ricas em magnetita e por vezes dobradas (Figura 2.15). Quando é possível observar porções de rocha aflorante, normalmente formam camadas bastante fragmentadas, mas que permitem restituir a foliação principal e que quase sempre estão sotopostas por material coluvionar (Figura 2.16). Porém, na maioria dos casos ocorrem como blocos centimétricos a decimétricos, mais raramente métricos, concentrados em uma área de solo bastante avermelhado (figuras 2.17 e 2.18).



Figura 2.15 – Afloramento de formação ferrífera bandada e dobrada da Formação Jucurutu, localizado na Fazenda Itapuã (Lajes/RN).



Figura 2.16 - Formação ferrífera bandada em trincheira na área de Saco Seco, na região da mina de Saquinho em Cruzeta/RN. É possível observar o mergulho de baixo ângulo da camada de rocha e o limite com o colúvio.



Figura 2.17 – Concentração de blocos centimétricos a decimétricos de formação ferrífera na localidade de Riachão, 7,8 km noroeste da mina de Saquinho (Caicó/RN).



Figura 2.18 – Concentração de blocos métricos de formação ferrífera bandada, localizada 900m sudeste do Alvo Saco Seco na região da mina de Saquinho. (Cruzeta/RN).

Os afloramentos mais expressivos de formações ferríferas estão no polígono da área de estudo sudoeste, na região da mina de Saquinho (Figura 2.19). No polígono nordeste as melhores exposições estão na Fazenda Itapuã (Figura 2.20), no município

de Lajes. As relações das formações ferríferas em Saquinho e Fazenda Itapuã com as encaixantes e o embasamento podem ser observadas nos perfis das figuras 2.21 e 2.22.



Figura 2.19 – Afloramento de formação ferrífera bandada da Formação Jucurutu localizada na Cava 01 próxima a sede da mina de Saquinho (Cruzeta/RN).



Figura 2.20 - Afloramento de formação ferrífera bandada da Formação Jucurutu na localidade de Fazenda Itapuã (Lajes/RN).

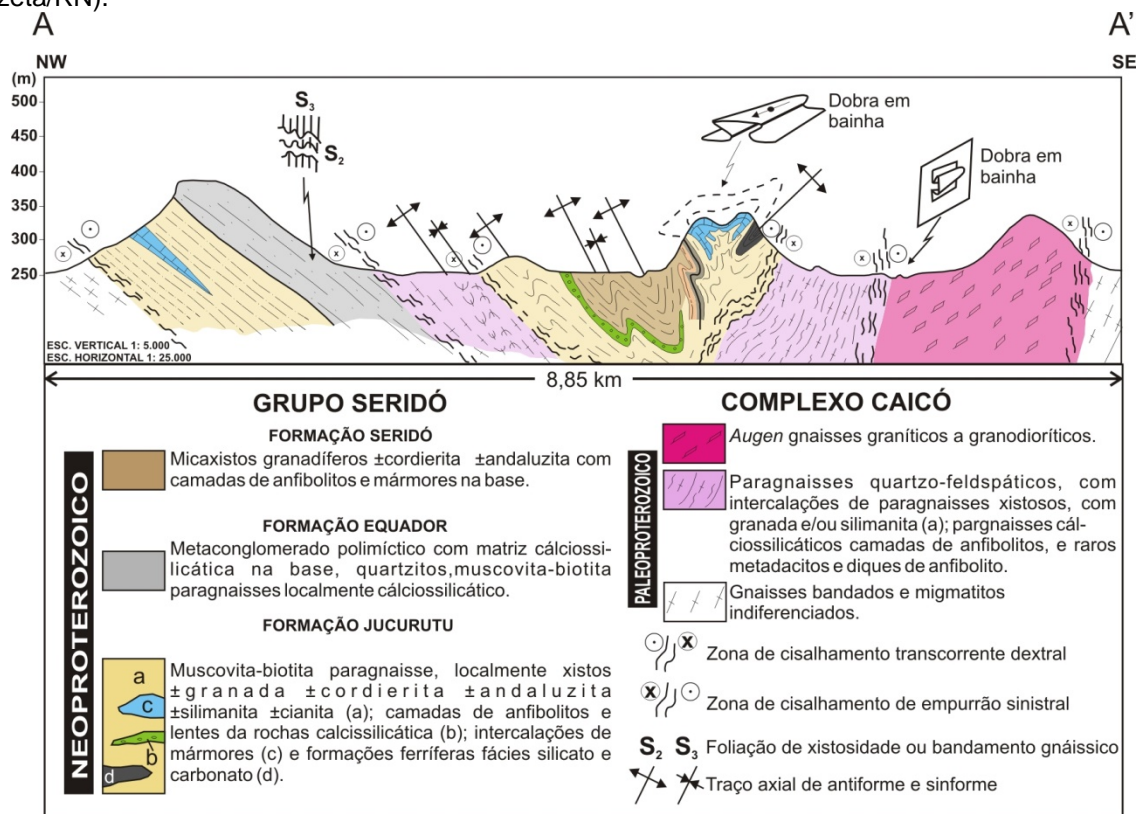


Figura 2.21 – Perfil A-A' de direção NW-SE da região da Serra do Feiticeiro e Fazenda Itapuã no município de Lajes/RN, modificado de Barbalho (1992). O contato entre as unidades do Grupo Seridó (formações Equador e Jucurutu) e do Complexo Caicó são marcadas por empurrões em zonas de rochas milonitizadas. Na área da Fazenda Itapuã a formação ferrífera ocorre encaixada em biotita gnaisses da Formação Jucurutu, sotoposta por camada de mármore nos flancos de uma dobra em bainha. O perfil está orientado na figura 2.5.

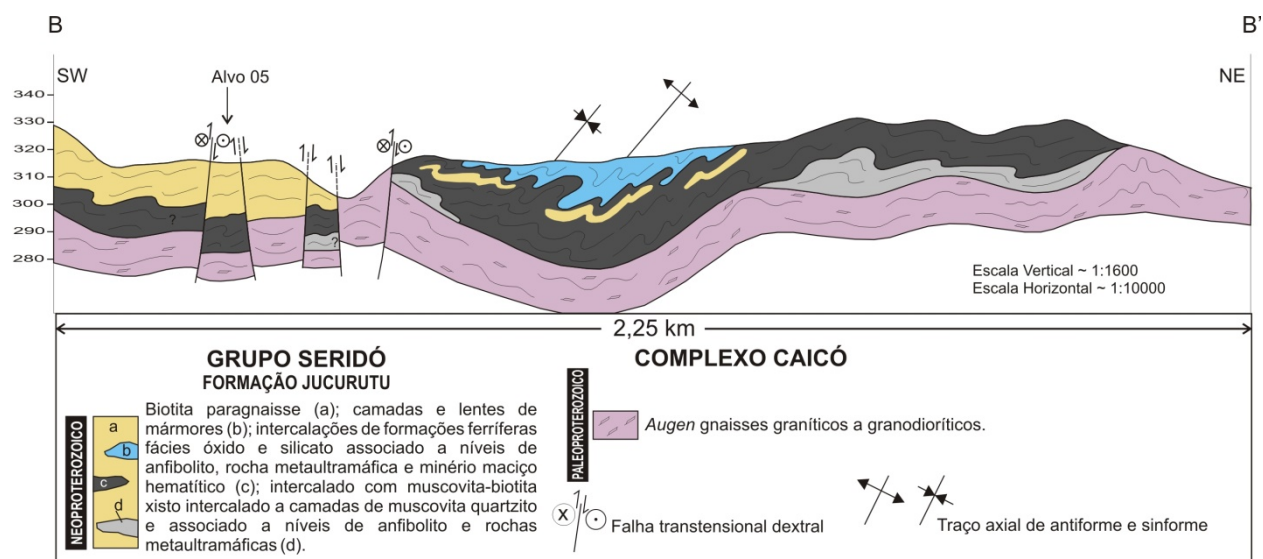


Figura 2.22 – Perfil B-B' de direção SW-NE da região da cava do Alvo 05 da mina de Saquinho, no município de Cruzeta/RN. A formação ferrífera ocorre encaixada em gnaisses da Formação Jucurutu, com lentes de anfibólitos, metaultramáficas e quartzitos, sotoposto por camadas de mármore. Todas essas rochas repousam sobre os augens gnaisses do Complexo Caicó e todo o pacote rochoso apresenta dobramentos suaves com planos axiais paralelos à direção da foliação regional, cortados por falhas posteriores ao evento tectônico principal. Os falhamentos formam um conjunto de blocos altos e baixos. O perfil está orientado na figura 2.6.

Os litotipos da Formação Equador (NP3se) afloram predominantemente no quadrante sudeste das áreas de estudo dos polígonos nordeste e sudoeste. Na Serra do Feiticeiro, município de Lajes, aflora em um pacote com mais de 100 metros de espessura. Normalmente formam cristas no relevo com direção norte e nordeste. São constituídos por quartzitos puros, muscovita quartzitos (Figura 2.23) e níveis métricos de metaconglomerado (Figura 2.24).



Figura 2.23 – Detalhe dos muscovita quartzitos da Formação Equador (Serra do Feiticeiro).



Figura 2.24 – Afloramento composto por camada de metaconglomerado oligomítico relacionado a Formação Equador (Sítio Pedra Preta de Baixo, São Tomé/RN).

Os metassedimentos da Formação Seridó (NP3ss) ocorrem principalmente nos quadrantes nordeste e sudeste da área de estudo do polígono nordeste. No polígono sudoeste ocorre principalmente na porção centro-sudeste e em uma faixa de direção aproximadamente leste-oeste no extremo noroeste dessa área. Nas duas áreas de estudo ocorrem duas litofácies principais: i) micaxistos (Figura 2.25), e granada micaxistos (Figura 2.26); e ii) cordierita (Figura 2.27), andaluzita, estaurólita (Figura 2.28) e/ou sillimanita xistos com granada contendo níveis de anfibólito. Na área do polígono sudoeste ocorre uma terceira litofácies: clorita-sericita-biotita xistos/filitos.



Figura 2.25 – Aspecto de campo do micaxisto da Formação Seridó situado na localidade de Riacho Fechado (Currais Novos/RN).



Figura 2.26 – Granada micaxisto da Formação Seridó na localidade de Conrado, na região da mina São Francisco (Currais Novos/RN).



Figura 2.27 – Nódulos centimétricos de cordierita em micaxistos da Formação Seridó, na localidade de Riacho Fechado (Currais Novos/RN).



Figura 2.28 – Cristais milimétricos de estaurólita (setas amarelas) e nódulos centimétricos de cordierita (setas vermelhas) associados aos micaxistos da Formação Seridó, na região de Malhadinha (Pedra Preta/RN).

Na área de estudo (polígono nordeste) o magmatismo Ediacarano (Brasiliano) ocorre sob a forma diversos corpos com dimensões e formas variadas, sendo estes constituídos por rochas das suítes intrusivas Itaporanga, São João do Sabugi, Conceição e Dona Inês, além de corpos menores cartografados como granitoides indiscriminados.

A Suíte Intrusiva São João do Sabugi (NP3 δ 2s) é formada principalmente por quartzo monzonitos, quartzo dioritos, gabros, piroxênitos, norítos e por vezes magnetitos. A Suíte Intrusiva Itaporanga (NP3 γ 2it) corresponde a monzogranitos porfiríticos. As rochas predominantes da suíte Dona Inês (NP3 γ 3di) são constituídas por biotita granitos de composição sienogranítica a monzogranítica, equigranulares, com granulação média, por vezes grossa. A Suíte Conceição (NP3 γ 2c) ocorre apenas na área de estudo do polígono sudoeste como monzogranitos e granodioritos a tonalitos equigranulares finos a médios. Os granitoides Indiscriminados (NP3 γ i) são rochas granitoides com composição petrográfica definida, porém com quimismo ainda não determinado. São rochas hololeucocráticas e leucocráticas.

Os corpos e diques pegmatíticos (ϵ 12p) provavelmente tem idade cambriana. São representados por inúmeros diques e corpos de pegmatitos relacionados à Província Pegmatítica da Borborema. Ocorrem na porção leste-sudeste dos polígonos nordeste e sudoeste de estudo. Estão intrusivos principalmente em micaxistos da Formação Seridó e nos ortogneisses do Complexo Caicó, e em menor quantidade nas rochas graníticas da Suíte Intrusiva Dona Inês. A textura é fanerítica, de granulação grossa, muitas vezes porfirítica, inequigranular. Baumgartner et al. (2006) atribui idades variando entre 509,5 \pm 2,9 Ma e 514,9 \pm 1,1 Ma para esses corpos rochosos, baseados em idade U-Pb de minerais do grupo da columbita-tantalita.

Os corpos e diques de sienogranito a granodiorito (ϵ γ g) são encontradas em diversos locais da área sudoeste, a exemplo dos que ocorrem na região de São Vicente - Florânia (RN). São corpos de direção preferencialmente NE com espessuras centimétricas a decimétricas, intrusivos nos demais litotipos precambrianos encontrados na região, sugerindo assim uma idade mais jovem. Esta unidade é formada por granitoides leucocráticos de coloração cinza a rosa, textura fanerítica de granulação fina a média e equigranulares.

As unidades cretáceas incluem apenas as rochas do Magmatismo Rio Ceará-Mirim (K1βcm) (basaltos e diabásios) que ocorrem sob a forma de enxame de diques com direção preferencial leste-oeste.

No cenozoico ocorre o Magmatismo Macau (E3βm) que corresponde a corpos semicirculares de olivina basaltos e os sedimentos (arenitos médios e arenitos conglomeráticos ferruginosos, com estrutura maciça e por vezes com estratificação plano-paralela) da Formação Serra dos Martins, além das coberturas colúvio-eluviais, depósitos aluvionares e de terraços.

Os eventos deformacionais atribuídos às áreas de estudo (polígonos nordeste e sudoeste) foram caracterizados por Medeiros & Dantas (2015). Três eventos deformacionais (dúcteis) foram designados cronologicamente do mais antigo ao mais novo (D1, D2 e D3) e atribuídos ao período precambriano, além de estruturas frágeis correlacionadas à tectônica fanerozoica.

O evento D1 foi observado apenas em litotipos paleoproterozoicos (Complexo Arábia, Caicó e Santa Cruz). Corresponde a uma deformação sub-sólida em rochas magmáticas onde é possível reconhecer características ígneas (texturas e estruturas) preservadas na rocha. Feições de campo mais preservadas deste evento são caracterizadas a partir de estilos de redobramentos.

Ao evento D2 foi atribuído uma deformação tangencial com transporte para noroeste, observada tanto em litotipos de idade paleoproterozoica (Complexo Caicó), como neoproterozoica (Grupo Seridó e alguns granitoides ediacaranos). A foliação associada a este evento (S2) era originalmente de baixo ângulo, possivelmente mergulhando para sudeste. Indicadores cinemáticos na região de São Vicente-Florânia sugerem transporte tectônico dominante de sudeste para noroeste, incluindo dobras isoclinais recumbentes, fenocristais rotacionados, estruturas S-C e vergência de dobras.

O evento D3 é caracterizado por zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais e dobramentos sinformais e antiformais que afetam a foliação S1, S2 e o acamamento S0. Nas proximidades das zonas de cisalhamentos, a foliação milonítica (S3) é de alto ângulo, estando associada a uma lineação de estiramento subhorizontal (L3X) e critérios cinemáticos dextrais, tais como estruturas S-C, porfiroblastos e/ou porfiroclastos assimétricos, veios rompidos/boudinados e peixes de foliação. Também

são observadas dobras apertadas com planos axiais verticalizados e paralelizados a foliação S3.

Atribuídos a uma fase tardia do evento D3 são observados vários diques de granitos, pegmatitos e veios de quartzo, intrusivos nos litotipos pré-cambrianos da região.

As estruturas frágeis fanerozoicas são evidenciadas por falhas e fraturas verticalizadas com direção aproximadamente E-W, por vezes com diques de basaltos Rio Ceará-Mirim associados.

Capítulo 3

Capítulo 3 - Revisão sobre Formações Ferríferas e Estado da Arte dos Estudos de Rochas Ferríferas no Rio Grande do Norte

3.1 – Revisão sobre Formações Ferríferas

3.1.1 – Conceito e classificação de formações ferríferas

As rochas mais ricas em ferro, denominadas de formação ferrífera, foram definidas por James (1954) como sedimentos de precipitação química, tipicamente laminado ou com finas camadas, contendo 15% ou mais de ferro de origem sedimentar, comumente, mas não necessariamente contendo camadas de chert. James (1966) viria a sugerir a distinção entre rochas sedimentares ricas em ferro fanerozoicas (*ironstones*) e formações ferríferas bandadas précambrianas (*banded iron formations* - BIFs), com base na distinção dos processos que levaram à sua formação. Posteriormente Klein & Beukes (1992) redefiniram como um sedimento químico finamente bandado ou laminado com um teor de ferro anormalmente alto, comumente, mas não necessariamente com camadas de chert. Quando as camadas de chert são típicas utiliza-se o termo formação ferrífera bandada.

A mineralogia das formações ferríferas varia com a combinação de processos deposicionais, diagenéticos e metamórficos. Os minerais mais importantes são hematita, magnetita, siderita, pirita e chamosita. Outros minerais importantes podem estar associados como quartzo, carbonatos (ankerita, dolomita e calcita) e silicatos (riebeckita, minerais da série cummingtonita-grunerita e ferro-clorita) (Gross 1965 e James 1966).

Dentre as várias classificações sugeridas para as formações ferríferas Trendall & Blockley (2004) citaram que nenhuma delas provou ser completamente satisfatória, porém algumas são as mais conhecidas e utilizadas, como as de James (1954) e Gross (1965, 1980, 1983). James (1954) dividiu as rochas ferríferas em quatro fácies sedimentares (óxido, silicato, carbonato e sulfeto) aplicando o princípio que a precipitação química é fortemente controlada pelo Eh-pH na formação da mineralogia de rochas ferríferas. Já Gross (1965, 1983) dividiu as formações ferríferas em escala de unidades estratigráficas: tipo Algoma, Lago Superior e Rapitan.

A classificação baseada em fácies sedimentares (James 1954, 1966) é dividida em quatro subdivisões (Tabela 3.1), de acordo com o mineral de ferro dominante: fácies óxido (hematita/magnetita), fácies carbonato (ankerita/siderita), fácies silicato (greenalita, minnesotaita, stilpnomelano) e fácies sulfeto (pirita). Para James (1954) as fácies se distribuiriam na bacia de acordo com a profundidade da coluna d'água, com as fácies sulfeto, carbonato e óxido variando de ambiente mais profundo para mais raso, respectivamente. Já a fácies silicato, por ser estável sob condições variáveis, teria uma distribuição mais complexa. Clout & Simonson (2005) não considerada apropriada a classificação de James (1954) para formações ferríferas metamorfizadas e/ou enriquecidas, pois processos secundários ou metamórficos podem gerar assembleias parcial ou totalmente distintas da mineralogia primária, tornando difícil o reconhecimento de seu protólito.

Tabela 3.1: Principais feições de cada fácies de formações ferríferas de James (1954). Compilado de Chemale Junior & Takehara (2013).

	Sulfetada	Carbonática	Silicática		Óxido	
			Não granular	Granular	Magnetítica	Hematítica
Litologia	Laminado a finamente laminado, folhelho carbonático pirítico preto. <i>Chert</i> raro.	Finamente acamadado a laminado, consiste de alternância de camadas de <i>Chert</i> cinza e carbonato.	Laminada verde-claro a escuro. <i>Chert</i> raro.	Maciço verde-escuro com acamamento irregular de camadas de <i>Chert</i> e magnetita.	Finamente acamadada ou não, com alternância de magnetita e <i>Chert</i> , silicato ou silicato + carbonato.	Finamente acamadada ou não, com alternância de hematita e <i>Chert</i> cinza e jaspe vermelho.
Mineral de ferro	Pirita	Carbonato rico em ferro.	Silicato de ferro.	Silicato de ferro.	Magnetita.	Hematita cristalina.
Min. de Fe secundário	Carbonato	Pirita silicato de Fe, magnetita.	Carbonato magnetita.	Magnetita, carbonato, hematita.	Silicato de Fe carbonato hematita.	Magnetita.
% de Fe	15-25	20-35	20-30	20-30	25-35	30-40
Feição principal	"Grafítico"	Estiólitos comuns.	Estruturas laminadas.	Granulares.	Fortemente magnético.	Comumente oolítico.
Ambiente de origem	Fortemente redutor anaeróbico.	Redutor.	Variável, tipicamente meio redutor.	Meio oxidante a meio redutor.	Meio oxidante a meio redutor.	Fortemente oxidante.

A classificação sugerida por Gross (1980) separa as formações ferríferas do pré-cambriano do Canadá em dois grandes grupos - Algoma e Superior, com base nos principais ambientes tectônicos e os tipos de formações ferríferas geradas em cada ambiente de deposição (Figura 3.1). O tipo Rapitano ocorre em menor escala.

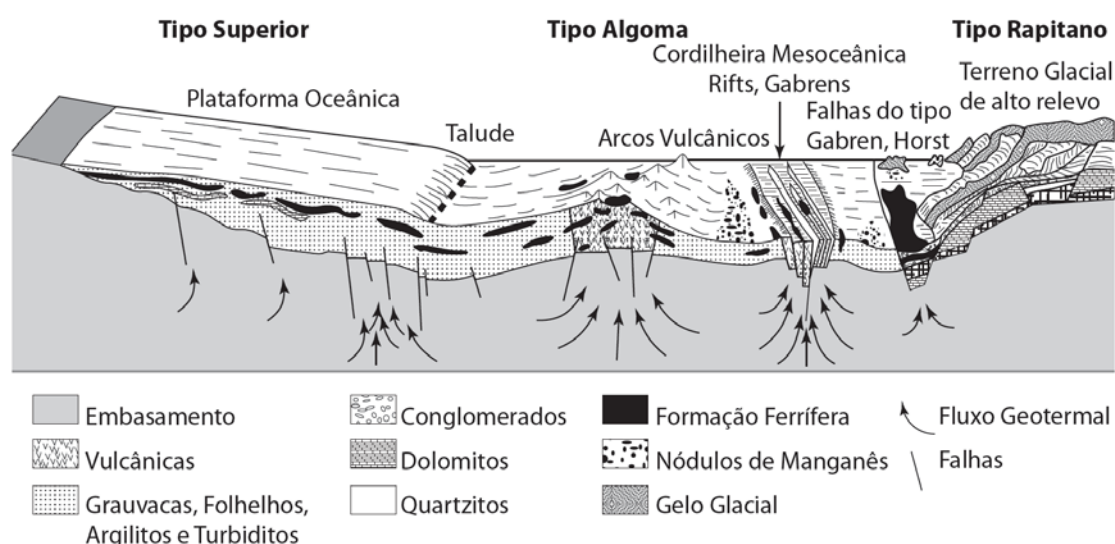


Figura 3.1 – Ambientes tectônicos e tipos de formações ferríferas associadas (Gross 1980).

Formações ferríferas do tipo Algoma são formadas junto a arcos vulcânicos e nos *riffts* de cadeia Mesoceânica, com o ferro de origem vulcânica. Ocorrem relacionados à sequências metavulcanosedimentares tipo greenstone (Bekker et al. 2010). Apresentam textura bandada e ocorrem do Eoarqueano ao Paleoproterozoico Inferior. Costumam ser relativamente pequenas, com pouca espessura (10-100m), extensão lateral (<10 km) (Goodwin 1973) e tonelagem (<10¹⁰) (James & Trendall 1982).

As formações ferríferas do tipo Superior são formadas nas plataformas oceânicas estáveis, próximas da costa, cuja contribuição de ferro teria origem na lixiviação das rochas existentes e contribuição vulcânica. Segundo Bekker et al. (2010) elas ocorrem intercamadas com rochas sedimentares, apresentam textura granular e oolítica, sendo mais comuns após o Paleoproterozoico Inferior. Apresentam uma grande extensão lateral, espessura e tonelagem (>10¹³) (James & Trendall 1982).

Os depósitos do tipo Rapitano foram gerados no Neoproterozoico pela lixiviação do ferro, causado pelo degelo, formando depósitos em *grabens* e *horst*. Esta categoria corresponde ao grupo de formações ferríferas geradas após o chamado evento

“Snowball Earth”, quando a glaciação global cobriu os oceanos, levando-os novamente a um estado de anoxia que permitiu o retorno momentâneo da deposição desse tipo de rocha (Gross 1973, Young 1976).

3.1.2 – Mecanismos de geração dos depósitos de ferro

As formações ferríferas hospedam a maioria dos depósitos econômicos de ferro do mundo. Estão distribuídas principalmente em terrenos arqueanos e proterozoicos, sendo que 90% dessas rochas foram depositadas no intervalo entre 2.5 e 1.8 Ga (James 1983, Klein 2005), o que sempre promoveu pesquisas sobre origem, configuração deposicional e distribuição espacial e temporal. Várias revisões recentes foram realizadas, como Klein (2005), Bekker et al. (2010) e Planavsky et al. (2010). As discussões sobre as condições básicas que levam à deposição de formações ferríferas em oceanos antigos são geralmente consensuais (Holland 2005), apesar de Klein (2005) afirmar que os mecanismos envolvidos na deposição de formações ferríferas permanecem mal compreendidos, mesmo depois de mais de um século de investigação.

As formações ferríferas parecem estar depositadas em estreita associação com a atividade vulcânica (formações ferríferas tipo Algoma) ou submersas em plataformas continentais mais distantes da atividade vulcânica submarina (formações ferríferas do tipo Lago Superior) (Klein 2005). As partículas precursoras para esses tipos de rochas precipitaram a partir de água do mar contendo níveis de Fe ferroso dissolvido (Holland 1973). A existência de ferro ferroso marinho foi possível devido a:

(1) uma atmosfera redutora ou com um baixo potencial oxidante (Holland 1984, Bekker et al. 2004);

(2) baixas concentrações de sulfato e sulfeto marinhos (Canfield & Teske 1996, Habicht et al. 2002); E

(3) um fluxo de Fe hidrotermal elevado (Kump & Seyfried 2005). Estas condições persistiram, pelo menos episodicamente, até o Paleoproterozoico superior em torno de 1,8 Ga (Holland 1984, Poulton et al. 2004, Slack et al. 2007). Os períodos de deposição mais significativos ocorreram durante a colocação de grandes províncias ígneas, o que aumentou a descarga de Fe hidrotermal (Barley et al. 1997, Isley & Abbott 1999).

O modelo clássico e mais amplamente aceito para a deposição de formação ferrífera afirma que a oxigenação livre nos oceanos induz a oxidação do ferro ferroso.

Este modelo, defendido por Cloud (1965), sugere que a deposição de formação ferrífera ocorreu na interface entre águas rasas oxigenadas e águas redutoras emergentes ricas em Fe. As águas rasas oxidantes foram ligadas a comunidades prolíficas de fotossintetizadores oxigenados.

A oxidação metabólica de Fe ferroso também foi proposta como mecanismo para a deposição da formação ferrífera. A importância da oxidação microaerofílica do Fe microbiano foi reconhecida há quase um século (Harder 1919). A oxidação fotossintética anoxigênica, fotoferrotropica, é outra via metabólica de oxidação do Fe ligada à deposição de formação ferrífera por Garrels & Perry (1974). Mais recentemente, descobriram-se organismos capazes de acoplar metabolicamente oxidação de Fe a redução de nitrato, proporcionando outro mecanismo possível mediado microbialmente para a deposição de formações ferríferas (Edwards et al. 2003). Também foi proposto que as formações ferríferas podem ser produtos puramente abiogênicos. Muitas formações ferríferas são compostas predominantemente por carbonatos de Fe ou silicatos de Fe sugerindo constituir precipitados marinhos abióticos (Ohmoto et al. 2004).

Outro mecanismo importante considerado é a oxidação de Fe ferroso induzida por radiação ultravioleta (UV; Braterman et al. 1983, Anbar & Holland 1992), onde a atmosfera era predominantemente anóxica e a radiação UV era mais intensa do que nos dias atuais, levando à quebra de moléculas de água dos oceanos, liberando oxigênio na atmosfera. A geração das BIFs se deu pela combinação do ferro ferroso dissolvido nos oceanos com o oxigênio da atmosfera. Esse processo levou a oxidação do ferro e sua consequente precipitação. Porém, a dependência da radiação UV para a eficiência da oxidação em soluções complexas de água do mar tem sido questionada (Konhauser et al. 2007). A oxidação de Fe ferroso em fluidos hidrotermais devido à separação de fases é mais um possível mecanismo para deposição de formação ferrífera do tipo Algoma (Foustoukos & Bekker 2008), mas este processo não pode explicar formações ferríferas do tipo Lago Superior depositadas em plataformas continentais estáveis longe da atividade vulcânica submarina.

A figura 3.2 inclui uma perspectiva geral dos mecanismos discutidos neste item, levando em consideração, em um aspecto mais amplo, que a deposição das formações ferríferas bandadas esteja relacionada à evolução atmosférica e biológica, assim como aos padrões de ciclos tectônicos globais (Klein 2005, Bekker et al. 2010).

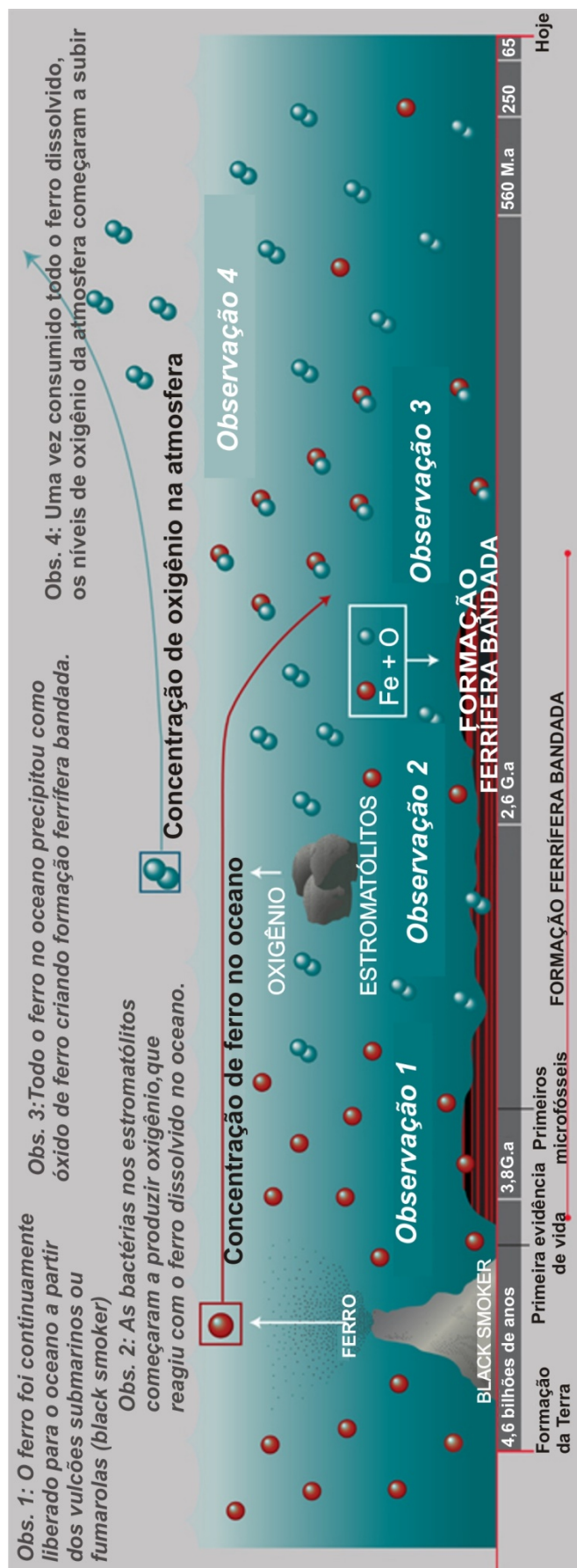


Figura 3.2 – Painel do Hall of Planet Earth do American Museum of Natural History sobre as condições necessárias para deposição das formações ferríferas bandadas do Paleoproterozoico e Arqueano. Disponível em: http://www.amnh.org/var/ezflow_site/storage/images/media/amnh/images/exhibitions/permanent-exhibitions/rose-center-for-earth-and-space/hall-of-planet-earth2/hope-illustrations/origins-of-the-banded-iron-formation_ill/1011633-1-eng-US/origins-of-the-banded-iron-formation_ill.jpg. Acesso: 13/09/2016.

3.1.3 – Tipos de depósitos de minério de ferro

Com base nos mecanismos de geração discutidos anteriormente, a formação das rochas ferríferas está intimamente relacionada à maneira como foram depositadas ao longo dos períodos geológicos. Os depósitos de ferro podem ser classificados, geologicamente em cinco categorias principais (Chemale Junior & Takehara 2013):

- Depósitos acamadados ou formações ferríferas bandadas (tipos Algoma, Carajás, Lago Superior e *Rapitan*).
- Depósitos relacionados a atividades magmáticas e/ou vulcano-sedimentar (tipo Kiruna e Lahn-Dill).
- Depósitos formados por metamorfismo de contato (tipo *skarn*).
- Depósitos sedimentares oolíticos e pisolíticos (tipo Clinton-Minette).
- Depósitos resultantes de alteração e acúmulo em superfície.

Os depósitos acamadados ou formações ferríferas bandadas constituem a mais importante de todas as classes de mineralizações ferríferas, não apenas do ponto de vista econômico. O pré-cambriano é o período mais importante para deposição dessas rochas, pois representam 97% das formações ferríferas bandadas, sendo que 92% foram depositadas no Proterozoico Inferior (Goodwin 1982). Aquelas que são arqueanas podem ser subestimadas, pois formam depósitos descontínuos, deformados e desmembrados tectonicamente (Trendall 2002, Klein 2005). São rochas finamente bandadas ou laminadas, consistindo principalmente de minerais de sílica e ferro formados por precipitação química e, posteriormente modificada por diagênese e metamorfismo (James & Trendall 1982). Os fatores responsáveis para formação dessas rochas foram discutidos no item anterior (3.1.2) deste capítulo.

O minério de ferro denominado tipo Kiruna contém apatita com magnetita, ocorrendo em várias partes do mundo, gerados do Proterozoico ao Recente, apresentando forte conexão com processo de resfriamento do magma de rochas cálcico-alcalinas a levemente alcalinas. Sua origem ainda é controversa, pois alguns pesquisadores acreditam que o minério foi gerado no processo de diferenciação magmática, atingindo o posicionamento atual em decorrência do sistema intrusivo magmático, enquanto outros defendem que esse minério foi gerado pela deposição sin-sedimentar marinha (Chemale Junior & Takehara 2013).

Os depósitos de minério de ferro Lahn-Dill são do tipo vulcano sedimentar e formam depósitos característicos do grupo predominantemente hematíticos que ocorrem do Devoniano e Carbonífero Inferior na Europa Central (Quade 1976). A posição geotectônica e paleogeográfica, as feições de sedimentação e elementos traços são muito distintos de outras formações ferríferas, especialmente quando comparadas com minérios itabiríticos e oolíticos. Esses depósitos formam pequenos corpos com conteúdos variáveis de teores de ferro, podendo formar corpos com alto grau de hematita pura, que representa a maior concentração de ferro em ambiente sedimentar (Chemale Junior & Takehara 2013).

Os depósitos do tipo *skarn* são gerados pela intrusão de corpos ígneos dentro de camadas de rochas sedimentares carbonáticas. Esse tipo de depósito também é conhecido como depósito de ferro pirometassomático ou metassomático de contato (Ray, 1995). É uma mineralização de predomínio de magnetita associada com ganga de *skarn* (incluindo *skarns* de ferro cálcico ou magnésiano) (Chemale Junior & Takehara 2013).

Os depósitos de ferro oolíticos e pisolíticos (tipo Clinton-Minette) são menos importantes que os BIFs, em virtude do fato de sua distribuição ser mais restrita. Sua ocorrência é ampla, desde o Arqueano ao presente. No entanto, as maiores reservas são do Paleozoico. O ambiente geológico dos dois tipos de minérios é similar, mas diferem no componente principal, onde a goethita é comum no tipo Minette e a hematita no tipo Clinton (Chemale Junior & Takehara 2013).

Por fim os depósitos resultantes de alteração em acúmulo e superfície estão localizados próximos aos depósitos ricos em ferro e são formados a partir do processo intempérico e de lixiviação de rochas ricas em ferro e podem ser encontrados desde blocos rolados até como depósitos de ferro em paleocanais (Chemale Junior & Takehara 2013). São depósitos com maior grau de impurezas por serem gerados a partir de várias fontes de sedimentos.

3.2 – Estado da Arte dos Estudos de Rochas Ferríferas no Rio Grande do Norte

3.2.1 – Introdução

Trabalhos que incluíram cadastramento de recursos minerais contemplando ferro ou ainda cartografia de rochas ferríferas já foram introduzidos no item 2.1.3 (Formações ferríferas no Rio Grande do Norte). Porém, estudos que trouxeram alguma contribuição para gênese das rochas ferríferas no Rio Grande do Norte, nos Domínios São José de Campestre e Rio Piranhas Seridó foram poucos e serão abordados a seguir.

3.2.2 – Domínio São José de Campestre

Na região oriental do Estado do Rio Grande do Norte três trabalhos destacaram-se no estudo de gênese de formações ferríferas: Figueiredo (2012), Silva Filho (2012) e Abraão Filho (2016). Os três desenvolveram seus estudos, respectivamente, na porção sul, norte e central da região de idade arqueana no interior do Domínio São José de Campestre (Figura 2.2). Eles realizaram estudos de litoquímica, química mineral, isótopos estáveis e datação direta da sedimentação das formações ferríferas através do método Sm-Nd.

As formações ferríferas estudadas por Figueiredo (2012) são compostas, principalmente, por magnetita/hematita, quartzo, anfibólio (grunerita-cummingtonita) e piroxênio (hedenbergita). Relações químicas associadas às características petrográficas sugerem tratar-se de formações ferríferas fácies óxido e silicato. São formadas predominantemente por SiO₂ (37,7 a 66,5 wt.%) e Fe₂O₃ (31,3% e 59,6%) com concentrações muito baixas de Al₂O₃, TiO₂, CaO e MgO. Em geral, possuem razões La/SmCN > 1, Sm/YbPAAS <1 e Eu/SmPAAS >1 com concentrações totais de ETRY variando entre 6,03 a 106,36 ppm. As características geoquímicas marcaram a existência de dois grupos distintos de formações ferríferas (Grupo I e Grupo II). As formações ferríferas do Grupo I possuem concentrações relacionadas a maiores contribuições continentais/detríticas e padrões geoquímicos similares às formações ferríferas de idade paleoproterozoica, diferentemente das amostras do Grupo II, que apresentam uma afinidade mantélica mais forte e similaridades com formações

ferríferas de idade arqueana. Figueiredo (2012) também estudou os metacarbonatos a norte da cidade de Tangará, na região do Serrote Preto. Ele identificou três fácies denominadas de mármore calcíticos, mármore calci-dolomíticos e mármore dolomíticos. Os mármore calcíticos apresentaram concentrações de CaO e MgO entre 34,4% e 47,6% e 3,1% a 15%, respectivamente, maiores concentrações de elementos traços e ETRY, com padrões de enriquecimento de ETRL em relação aos ETRP e composições isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ variando de -10,1 a -1,7‰ (média de -4,3‰). Os calci-dolomíticos mostraram concentrações de CaO entre 30,4% e 36,1% e MgO entre 14,3% e 19,5% com $\delta^{13}\text{C}$ variando de -6,2 a 1,0‰. Já os dolomíticos apresentaram uma maior heterogeneidade nos valores dos elementos analisados com concentrações de CaO e o MgO entre 30,2% a 43% e 6,4% a 19,6% respectivamente, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ de -3,4 a 1,1‰.

A associação destes metassedimentos químicos (formações ferríferas e metacarbonatos) se complementa para caracterizar condições deposicionais distintas dentro dos mares arqueanos com variáveis condições oxirredox em que o Grupo I de formação ferrífera associado aos metacarbonatos refletem condições distais, nas plataformas marinhas, e o Grupo II condições de fundo oceânico, em sítios proximais aos vents hidrotermais. Ambos os grupos foram depositados em mares abertos, com condições restritas de oxigênio.

Silva Filho (2012) estudou as formações ferríferas bandadas na porção norte do Domínio São José do Campestre, associadas às rochas da Sequência Vulcano-Sedimentar Serra Caiada. As análises químicas de elementos maiores, em vinte amostras, mostraram composição química relativamente simples, com SiO_2 e Fe_2O_3 representando mais de 96% de sua composição total. A textura das rochas variaram de granoblástica média/fina a microbandada. Os cristais de quartzo são subeudrais a anedrais, mostrando contatos poligonais, serrilhados ou retos com opacos e/ou anfibólios da série cummingtonita-grunerita. Normalizado pelo condrito, o padrão de distribuição dos ETRs sugeriu a existência de três grupos distintos (grupos 1, 2 e 3).

No geral, as formações ferríferas mostraram razão Y/Ho entre 25 e 40 onde, valores abaixo de 30 indicam uma predominância de contribuição continental para estas rochas. As anomalias positivas de Eu revelaram a existência de um componente hidrotermal de alta temperatura na água do mar arqueano no local, enquanto que as variações observadas nas razões (Eu/Eu*) devem indicar mudanças no tempo e no

espaço da atividade das fumarolas no fundo da bacia. A presença de anomalias negativas de Ce, no terceiro grupo, juntamente com a relação $Y/Ho < 30$, sugere que, em algum momento, o mar ali existente era mais oxidado e possuía contribuição detrítica. As amostras dos grupos 1 e 2 com anomalias positivas de Eu, relação $Y/Ho > 30$ e anomalias positivas de Ce/Ce* sugerem a presença de ambiente redutor, com pouca ou nenhuma contribuição detrítica e *input* hidrotermal de mais alta temperatura. Dessa forma propõe-se que localmente, o oceano tenha tido diversas fumarolas atuando por longo período de tempo e as formações ferríferas da porção norte do DSJC tiveram um *input* hidrotermal diversificado.

As anomalias positivas de Európio exibidas pelas formações ferríferas do Grupo 1 assemelham-se àquelas apresentadas pelos tipo Algoma de idade arqueana. Os valores das anomalias de Eu do grupo 2 são menores que 1, podem ser interpretados como zonas da bacia onde soluções hidrotermais apresentavam temperaturas mais baixas e/ou regiões mais afastadas do campo hidrotermal. Assemelham-se aos das formações ferríferas do grupo 3, do tipo Lago Superior e de idade paleoproterozoica ($Eu/Eu^* < 1$), onde as anomalias negativas são interpretadas como decorrentes da pequena participação dos fluidos hidrotermais no ambiente de deposição das formações ferríferas. Silva Filho (2012) cita ainda que modelos de oceano arqueano propõem mares rasos com dorsal meso-oceânica mais elevada do que as atuais, de modo que as plumas hidrotermais pudessem ser injetadas até as águas mais rasas, atingindo as plataformas.

As idades modelo TDM das formações ferríferas analisadas por Silva Filho (2012) variam entre 3,5 e 2,4 Ga, sugerindo que diferentes fontes podem estar envolvidas na geração destas rochas. A idade de 3,7 Ga para amostras do Grupo 1 pode ser interpretada como a época de deposição e o valores de $\epsilon Nd (3,7 Ga)$ positivo sugerem um fonte mantélica para estas rochas. As demais amostras, grupos 2 e 3, não são cogenéticas, onde idades de 2,4 e 2,7 Ga podem ser interpretadas como eventos que causaram perturbação no sistema isotópico ou por épocas distintas de formação de rochas ferríferas. Embora exista esta grande variação na idade de proveniência das fontes destas rochas, elas são predominantemente arqueanas.

Abrahão Filho (2016) estudou corpos métricos a quilométricos de BIFs inseridas na Sequência Metavulcanossedimentar Serra Caiada, situados na porção central do Domínio São José do Campestre. Realizou um mapeamento em uma área de 45 km²

na escala 1:25.000 com coleta de amostras para petrografia, química de rocha e análises de microsonda eletrônica em cristais de magnetita. No geral as rochas são comumente constituídas de magnetita (45 - 55 %), quartzo (35 - 40 %) e traços de apatita (<1 %), mas foi possível para o autor distinguir três grupos petrográficos: o Grupo A composto por baixos conteúdos de anfibólio (até 4%, grunerita); o Grupo B com maior composição modal de anfibólio (até 10%, grunerita); o Grupo C com uma assembleia mineral mais heterogênea (até 7%, grunerita, hornblenda, cliinopiroxênio, ortopiroxênio e granada). As análises de microsonda eletrônica em cristais de magnetita do Grupo C de elementos maiores e alguns traços revelaram similaridades químicas limiares a Skarns, a depósitos do tipo IOCG e a BIFs químico-exalativas.

As distinções entre esses três diferentes grupos de BIF identificados por Abrahão Filho (2016) também são refletidas na química de rocha total e expressas na cartografia, uma vez que esses grupos estão distribuídos em zonas bem definidas no mapa. O Grupo A mostra os maiores conteúdos de metais base, Σ ETRY com média de 36 ppm, e anomalias positivas de Eu ($Eu/Eu^*PAAS = 1,26 - 2,27$). O Grupo B apresenta conteúdos médios de metais base, Σ ETRY médio de 87 ppm e ausência ou diminutas anomalias positivas de Eu ($Eu/Eu^*PAAS = 0,92 - 1,22$). O Grupo C apresenta os menores conteúdos de metais base, Σ ETRY médio de 88 ppm e ausência ou suaves anomalias positivas de Eu ($Eu/Eu^*PAAS = 0,84 - 1,26$). Em sua maioria, todos grupos mostram reais anomalias negativas de Ce (Grupo A, $Ce/Ce^*PAAS = 0,59 - 1,04$; Grupo B, $Ce/Ce^*PAAS = 0,62 - 0,89$; Grupo C, $Ce/Ce^*PAAS = 0,59 - 1,03$) e os grupos A e B apresentam anomalias positivas de Y (Grupo A, $Y/Y^*PAAS = 0,97 - 1,64$; Grupo B $Y/Y^*PAAS = 1,42 - 1,64$), enquanto que o Grupo C alterna entre anomalias positivas e negativas ($Y/Y^*PAAS = 0,76-1,42$). Os grupos A e B dispõem de padrões de ETRY levemente convexos depletados em ETR leves, e o Grupo C mostra variações desses padrões. Com base em todos esses dados, Abrahão Filho (2016) interpretou que essas formações ferríferas foram depositadas em ambientes submarinos, onde grupos A e B são mais influenciados por fumarolas hidrotermais com pouca contribuição sedimentar e o Grupo C mostra as maiores contribuições detríticas. Ele também concluiu que aparentemente a química dessas BIFs da porção central do Domínio São José do Campestre preserva quase que totalmente as assinaturas elementares de um oceano arqueano em avançado estágio de fechamento, evidenciando transições entre ambientes de MORB e de Arco.

3.2.3 – Domínio Rio Piranhas-Seridó

O primeiro trabalho que incluiu gênese de rochas ferríferas na região do Domínio Rio Piranhas-Seridó onde estão localizadas as áreas de estudo (polígonos nordeste e sudoeste) desta dissertação foi o de Campos (2011). Ele desenvolveu um estudo sobre as formações ferríferas bandadas da mina de Bonito, próximo à cidade de Jucurutu, e Serra da Formiga, no município de Florânia. Também contemplou os mármores da Formação Jucurutu, que ocorrem recobrando este grupo de rochas. As formações ferríferas são representadas por itabiritos e minério de ferro, actinolita ou cummingtonita-itabirito, além de tremolita xisto. Estudos de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ no mármores e $\delta^{53}\text{Cr}$ em formações ferríferas, associados a litoquímica de rocha, através do comportamento dos terras raras, indicam que as formações ferríferas da Formação Jucurutu nessas regiões foram depositadas em oceano anóxico, seguido da deposição em oceano óxico, o que aparentemente está de acordo com ambiente pós-glacial de deposição de capa carbonática. Os resultados deste trabalho foram incluídos em Sial et al. (2015), que será discutido em seguida.

Barbosa (2013) abordou dados geológicos, geoquímicos e tipológicos dos minérios de ferro da mina de Bonito, situada a 20 km do município de Jucurutu/RN. Esse depósito de ferro não está nas áreas de estudo, porém é uma das principais ocorrências desse bem mineral no Rio Grande do Norte. A autora identificou corpos ferríferos primários de origem vulcanosedimentar formados pelas formações ferríferas bandadas, representados pelos itabiritos de siglas Ia (itabirito anfibolítico), Iag (itabirito anfibolítico goethítico), Im (itabirito martítico) e Ime (itabirito martítico especularítico), bem como, corpos ferríferos de origem hidrotermal (alto teor de ferro) representados pelos corpos de siglas Mag (magnetitito), Smg (skarn magnesiano) e Stm (skarn tremolitito com actinolita). As observações de campo e estudos petrográficos mostraram variações nas proporções de magnetita (primária e secundária), hematita (martita, especularita), goethita e anfibólios ferríferos. Os itabiritos correspondem às formações ferríferas fácies óxido e óxido-silicato metamorizadas em condições de fácies anfibolito, enquanto os corpos de minérios secundários tem origem hidrotermal associada às fases finais de dobramento. Barbosa (2013) comparando os conteúdos dos elementos traços dos itabiritos da mina do Bonito aos de outras formações ferríferas, evidenciou um padrão diferente do tipo Algoma e semelhante ao tipo Lago Superior. Embora os teores absolutos dos elementos terras raras dos itabiritos da mina

do Bonito apresentaram, em geral valores muito baixos, a autora concluiu que o padrão de distribuição desses elementos quando normalizados pelo NASC é semelhante a grande maioria das formações ferríferas bandadas arqueanas e paleoproterozoicas de diversas parte do mundo, nos quais a anomalia de positiva de európio representa uma feição característica.

Sial et al. (2015) realizaram um estudo em formações ferríferas e mármores em várias localidades da Faixa Seridó, como por exemplo, Saquinho, Serra da Formiga, Bonito, Riacho Fundo, Serra dos Quintos, etc. Os itabiritos e minério de ferro analisados são sobrepostos por mármores, ambos da Formação Jucurutu. Estes autores utilizaram dados de relações de campo e isótopos estáveis de Sr e C nos mármores, Cr nos mármores e formações ferríferas, além de química dos elementos terras raras (ETR) nessas duas rochas, para discutir principalmente a idade de deposição da Formação Jucurutu e responder alguns questionamentos sobre as relações entre a deposição de carbonatos e formações ferríferas com uma glaciação neoproterozoica, além do comportamento paleo-redox do oceano no período de deposição.

No geral os padrões de isótopos de C da Formação Jucurutu apresentam valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ na base da formação variando para valores positivos seção acima. Os valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de rochas carbonáticas da Formação Jucurutu estão na sua maioria no intervalo 0,7074-0,7075, em uma proporção comumente observada no final Criogeniano ao início do Ediacarano. As formações ferríferas estudadas apresentam uma concentração de Cr superior à composição isotópica de costume e em grande parte não fracionada, similar aos valores médios de ambientes magmáticos. Junto com as anomalias de Ce, anomalias positivas de Eu e razões Y/Ho, a combinação de parâmetros geoquímicos e associação com rochas máficas assemelham-se as formações ferríferas bandadas (BIFs) tipo Algoma. Estas BIFs possivelmente foram formadas próximas às fontes hidrotermais, em águas profundas anóxicas e ácidas, por onde o Fe e Cr foram lixiviados de rochas máficas ou ultramáficas. Sua deposição foi seguida por carbonatos que mostram concentrações "normais" de Cr com valores de $\delta^{53}\text{Cr}$ ligeiramente fracionado de forma positiva. Estes carbonatos podem representar sequências de capas de carbonato pós-glacial depositadas em um ambiente marinho raso anóxico a ligeiramente óxico, como sugerido pelas razões Ce/Ce* vs Pr/Pr* e Ce/Ce* vs Nd.

Com base nesse conjunto de dados Sial et al. (2015) previram dois cenários diferentes para deposição da Formação Jucurutu. Um onde a sedimentação ocorreu em uma bacia madura tipo *rift* sem influência glacial durante a deposição de BIF e carbonatos, ou outra onde a deposição em uma bacia *rift* ocorreu na sequência final de uma glaciação, porém o gelo nunca teria chegado nessa bacia onde depositaram-se os sedimentos da Formação Jucurutu. Nesse caso, o único efeito glacial registrado na bacia seria o da queda do nível do mar, como indicado por carbonatos estromatolíticos sobrepostos por BIFs em alguns lugares.

Diante dessas considerações, Sial et al. (2015) percebem a necessidade de conhecer melhor as relações entre as rochas máficas e ultramáficas na região onde ocorrem as formações ferríferas ao longo da Faixa Seridó. Além de mapeamento de detalhe, relações de campo e datações geocronológicas são importantes para definição de que tipo de substrato rochoso foi necessário para criar um ambiente propício para deposição de rochas ferríferas.

Ferreira et al. (2015) contemplaram o estudo litogeoquímico das formações ferríferas bandadas na região de Lajes-RN, principalmente nas porções oeste e noroeste dessa cidade. São faixas métricas (40m x 160m) de direção NNE-SSW de rochas aflorantes, associadas à biotita tonalito gnaisses e hornblenda ortognaisse na porção leste do Domínio Rio Piranhas - Seridó. As formações ferríferas bandadas apresentam um continuo bandamento milimétrico, com camadas ricas em quartzo (40-45%) alternando com faixas ricas em magnetita (45-50%), comumente associada a anfibólios (1-5%; cummingtonita, Fe-hornblenda e Fe-actinolita) e piroxênios (1-3%; diopsídio e augita).

As análises de elementos maiores mostraram uma composição química de $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ entre 94,60 e 98,65%, representativa da associação quartzo + magnetita. Os teores dos demais óxidos são variáveis (1-4%), relacionados sempre a maior ou menor proporção modal de anfibólios e piroxênios nas amostras. Os elementos traços, normalizados pelo manto primitivo, mostraram anomalias positivas de Ba, U e Y, e anomalias negativas de Th, Zr, Hf, Nb, Rb e Sr. Padrões de distribuição dos elementos terras-raras (ETR), normalizado pelo PAAS, mostraram razões $(\text{La}/\text{Eu})=0,52 - 1,86$ com $\sum\text{ETR Leves} = 14,1 - 111,79$, $(\text{Gd}/\text{Lu})=0,38 - 1,79$ com $\sum\text{ETR Pesados} = 1,68 - 9,65$. 0,97 e $(\text{La}/\text{Lu})=0,46-2,75$.

Através das razões $Pr/Yb < 1$, anomalias positivas de La, Eu, e Y e negativas de Ce, em diagramas normalizados pelo PAAS, mostraram assinaturas típicas de ambientes marinhos. Anomalias positivas de Eu indicaram maior proximidade dos sítios de deposição de ferro em relação à área fonte de ETR. Razões Y/Ho entre 29, 2 e 51,8 associado a $Pr/Pr^* > 1$ indicam pouca derivação de fontes continentais.

Ferreira et al. (2015) concluíram portanto, com esses dados de química de rocha, em diagramas normalizados pelo PAAS, que as assinaturas são típicas de ambientes marinhos e os padrões são semelhantes às formações ferríferas do Tipo Superior paleoproterozoicas de Black Hills e do Supergrupo Transvaal. O conjunto de dados apresentados apontam para que o precipitado químico primário é resultado de soluções que representariam uma mistura de água do mar e fluidos hidrotermais, com restrita contribuição de detritos continentais.

Azevedo (2016) realizou estudos de petrografia de seções delgadas e polidas, além de litoquímica de elementos maiores e terras raras de rochas ferríferas na região de Cruzeta/RN e Florânia/RN. Esta autora identificou dois grupos petrográficos, os de formações ferríferas bandadas, correlacionáveis a Formação Jucurutu, além das formações ferríferas granulares, correlacionáveis as rochas do Complexo Caicó. Em ambos os grupos de rocha são comuns quartzo e minerais opacos (essencialmente hematita, magnetita e maghemita), podendo conter anfibólios e pequenas porcentagens de micas, zircão e apatita, esses três últimos especialmente nas formações ferríferas granulares. A litoquímica de elementos maiores indicou similaridades dos dois grupos de rochas aos tipos Algoma, Lago Superior e Rapitan, sem a possibilidade de correlação com nenhum tipo específico.

O padrão de terras raras para as formações ferríferas bandadas mostraram principalmente anomalias negativas de Ce e positivas de Eu, indicando uma subdivisão em três subgrupos com peculiaridades em sua origem. Azevedo (2016) sugere que para esse grupo de rochas sua deposição ocorreu no Neoproterozoico em um ambiente de rifte com considerável aporte hidrotermal. As anomalias de Ce mostram também que maioria destas amostras foi depositada em um ambiente transicional entre oxidante e redutor, com exceção de uma amostra anômala, cuja anomalia de Ce indica deposição sob condições mais oxidantes, ou que esta anomalia seja resultante do seu processo de enriquecimento.

No estudo de Azevedo (2016) o padrão de terras raras para as formações ferríferas granulares foram bem semelhantes, indicando cogeneticidade entre as amostras. As anomalias negativas de Ce e positivas de Eu são pouco pronunciadas. Azevedo (2016) sugere duas possibilidades para deposição desse grupo de rochas. A primeira, considerando uma origem sedimentar, indica que as rochas teriam sido depositadas em um ambiente relativamente próximo à costa e mais distante dos centros de descarga hidrotermal em relação àquelas da Formação Jucurutu, em um contexto diferente da evolução da Província Borborema. A segunda teria um possível protólito ígneo, cujo metamorfismo atuante foi suficiente para mascarar suas feições primárias e geração das anomalias de Ce e Eu observadas.

Capítulo 4

Capítulo 4 – Petrografia das Formações Ferríferas

4.1 – Introdução

Um conjunto de dados de 18 lâminas delgadas, 5 seções bipolidas e 4 seções polidas de rochas ferríferas encaixadas no embasamento (Complexo Caicó) e Formação Jucurutu será apresentado neste capítulo. Incluirá a descrição microscópica de ocorrências de formações ferríferas encontradas nos municípios de Lajes, Caiçara do Rio dos Ventos, São Tomé, Bodó e Santana do Matos na porção nordeste da Faixa Seridó, além dos municípios de Cruzeta, Caicó e Florânia na porção central da Faixa Seridó, todas no Estado do Rio Grande do Norte.

Dois grupos são separados macroscopicamente: rochas ferríferas com aspecto mais homogêneo, de textura granular e rochas ferríferas tipicamente bandadas (Figura 4.1). São correlacionáveis, respectivamente, às rochas encaixadas no Complexo Caicó e Formação Jucurutu, base do Grupo Seridó.

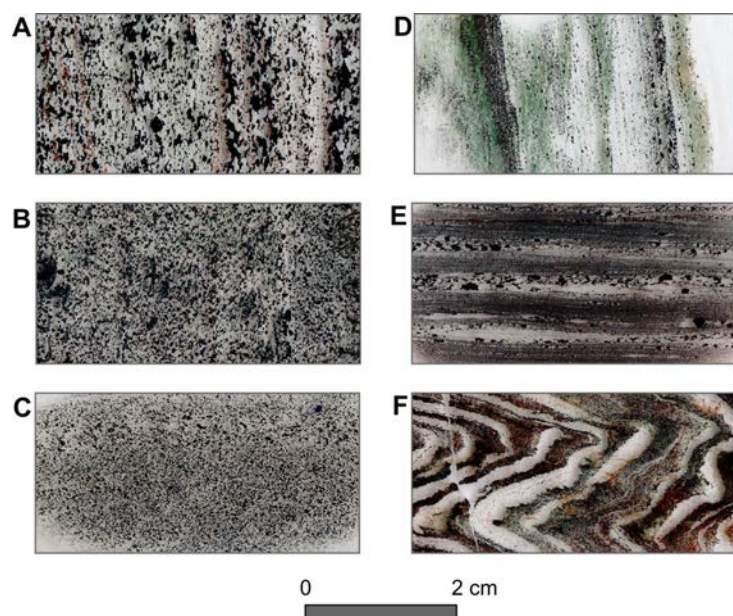


Figura 4.1 – Foto das lâminas delgadas das amostras AR-R-012 (A), EL-16A (B), RF-035 (C), AR-R-096 (D), RF-102 (E) e AR-R-192A seção XZ (F). As amostras dos itens A, B e C representam as formações ferríferas granulares. Os itens D, E e F são as formações ferríferas bandadas. Em incolor ocorrem os níveis de quartzo. Os cristais e níveis em preto são os minerais opacos (magnetita e/ou hematita). Em verde são os anfibólios e com tons avermelhados os hidróxidos de ferro.

A terminologia utilizada para as rochas mais homogêneas é um pouco discutível. Todas as rochas descritas neste trabalho são de origem metamórfica e em alguns casos apresentam uma foliação incipiente (Figura 4.1a). Em outras situações, o aspecto textural da rocha parece maciço (figuras 4.1b e 4.1c). Poderiam ser

classificadas como formação ferrífera granoblástica, considerando esse aspecto textural tão marcante. Porém Trendall (2002) sugere o uso do termo formação ferrífera granular (FFG ou GIF em inglês) como unidade litológica, assim como as formações ferríferas bandadas (FFB ou BIF em inglês), que é uma denominação clássica utilizada indiscriminadamente. Para Trendall (2002) o termo formação ferrífera granular é aplicado para rochas de idade paleoproterozoica e que não tem bandamento característico; porém Bekker et al. (2012) afirmaram que essa terminologia aplica-se bem para as rochas ferríferas do Canadá, mas em outros lugares do mundo existem os termos intermediários, tornando o uso dessa classificação ambígua. Eles consideram que a distinção entre BIF e GIF é descritiva e podem indicar a profundidade de deposição dessas rochas. As formações ferríferas granulares podem ser consideradas equivalentes de águas rasas das formações ferríferas bandadas de origem em águas profundas (Beukes & Klein 1992).

Nos estudos de rochas ferríferas realizados no Rio Grande do Norte apenas Azevedo (2016) utilizou a terminologia formação ferrífera granular para algumas rochas na região de Cruzeta e Florânia. Neste trabalho as rochas homogêneas, de textura predominantemente granoblástica e aspecto homogêneo, também serão denominadas de rochas ferríferas granulares, considerando o conceito anteriormente discutido, ajustando-se descritivamente à maioria do grupo de amostras analisadas e que estão encaixadas no Complexo Caicó.

4.2 – Rochas Ferríferas Granulares

Em escala de mão, as rochas ferríferas granulares apresentam coloração cinza escura a preta, com pontos esbranquiçados, ora com estrutura foliada visível, ora pouco visível. Desenvolvem textura granoblástica a nematogranoblástica, com granulometria fina a média, mais raramente grossa. As condições metamórficas são estimadas em fácies xisto verde superior a anfíbolito inferior envolvendo a cristalização de anfibólios e biotita. São compostas essencialmente de minerais opacos, quartzo e anfibólios.

O quartzo (45-55%) é xenoblástico (figuras 4.2 e 4.3), raramente hipidioblástico, constituindo agregados nematoblásticos em trama de forma. A extinção é ondulante, normalmente fraca a moderada. Recristaliza-se com textura granoblástica em ponto triplo e às vezes forma exudados acompanhando à foliação da rocha. Possui inclusões

de minerais opacos. Os tamanhos variam de 0,3 mm até 1,3 mm. As granulações menores são pouco deformadas e ocorrem intercrescidas com minerais opacos de granulação semelhante.

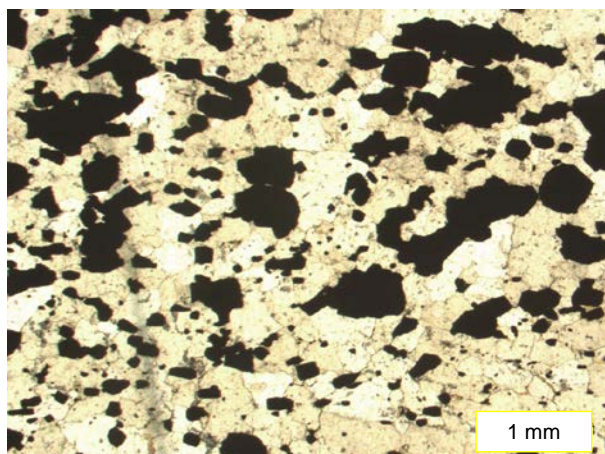


Figura 4.2 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando a formação ferrífera com os minerais opacos disseminados (cor preta) em contato com cristais de quartzo (cinza claro a branco). São dois grupos de minerais opacos com granulometrias distintas. Amostra AR-R-217A.

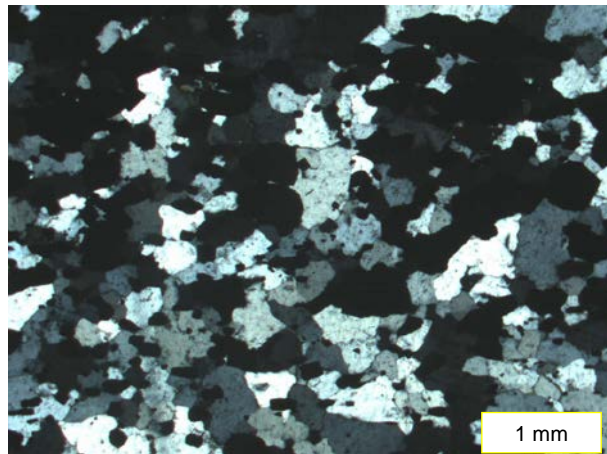


Figura 4.3 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis cruzados mostrando a formação ferrífera com os minerais opacos disseminados (cor preta) em contato com cristais de quartzo (cinza claro a escuro) xenoblásticos a sub-idioblásticos. Amostra AR-R-217A.

O anfibólio (5-10%) provavelmente é a grunerita (figuras 4.4, 4.5 e 4.7), xenomórfica, raramente idiomórfica até ripiforme, às vezes com geminação múltipla e arranjo nematogranoblástico, muitas vezes seguindo a orientação da rocha. Apresenta cores esverdeadas, amarronzadas e menos frequente incolores (Figura 4.7). É intergranular, ocorrendo mais raramente como inclusões em minerais opacos. Às vezes sofre microfissuramento com preenchimento de hidróxido de ferro. Os tamanhos raramente ultrapassam 1 mm segundo seu eixo maior.

No grupo de amostras estudadas, a grande maioria apresenta pouco (até 10%) ou nenhum anfibólio (Figura 4.2). Porém em duas amostras os anfibólios constituem entre 15 e 25% dos minerais da formação ferrífera granular. Nesses casos é comum a presença de anfibólio substituindo a magnetita, produzindo localmente a textura poiquiloblástica (Figura 4.5) com inclusões de minerais opacos e quartzo. O inverso também ocorre, justificando o intercrescimento de minerais opacos versus anfibólio.

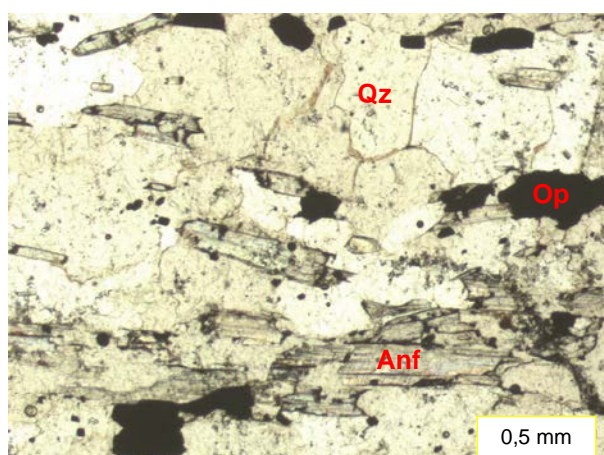


Figura 4.4 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando os cristais de anfibólio (Anf), quartzo (Qz) e opacos (Op) presentes na formação ferrífera. Os anfibólios são possivelmente da série cummingtonita-grunerita, exibem-se fortemente estirados e orientados na direção da foliação. Amostra AR-R-217B.

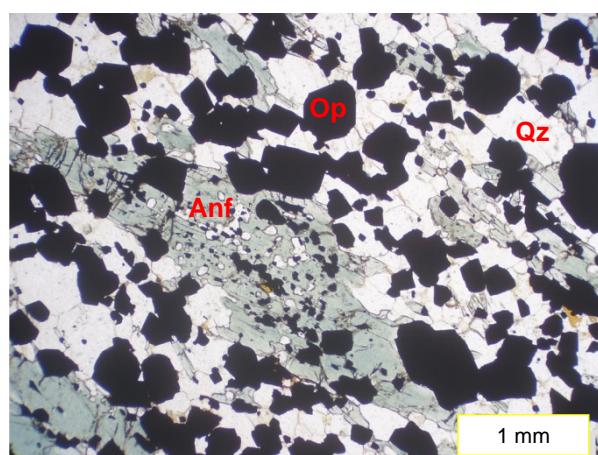


Figura 4.5 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando os cristais de anfibólio (Anf), quartzo (Qz) e opacos (Op) presentes na formação ferrífera. O anfibólio no centro da foto apresenta textura poiquiloblástica, com inclusões de quartzo e minerais opacos. Amostra EL-16A.

Os minerais opacos (40-45%) são xenoblásticos a idioblásticos (figuras 4.2, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7), ocorrendo como cristais isolados intergranulares ou formando agregados. Por vezes formam um arranjo nematogranoblástico. Desenvolvem hábitos quadráticos, losangulares e hexagonais. Em alguns casos apresentam leve orientação e em outros forte, com cristais localmente rotacionados ao longo da foliação principal. Recristalizam-se ao acaso mostrando crescimento por coalescência, às vezes englobando cristais de quartzo e anfibólio; porém também ocorrem como inclusão nas demais fases, em especial, nos anfibólios. Sofrem alteração para hidróxido de ferro. Os tamanhos variam de 0,5 mm até 5,5 mm.

Os hidróxidos de ferro (<1%) são xenoblásticos e coloides crescendo a expensas dos minerais opacos e anfibólios. Ocorrem bordejando os minerais opacos e preenchendo microfissuras destes últimos e clivagens e fissuras dos anfibólios. Em seção polida é possível reconhecer a goethita. A característica intersticial dos hidróxidos de ferro sugere fluidos hidrotermais ou metassomáticos que percolaram na rocha (Figura 4.6).

As seções polidas indicam que grande parte dos minerais opacos é hematita, com magnetita subordinada. A martitização (ou substituição por hematita) da magnetita é intensa (Figura 4.8) e invade os cristais pelas bordas e linhas de clivagem, deixando restos de magnetita inalterada apenas no núcleo dos cristais.

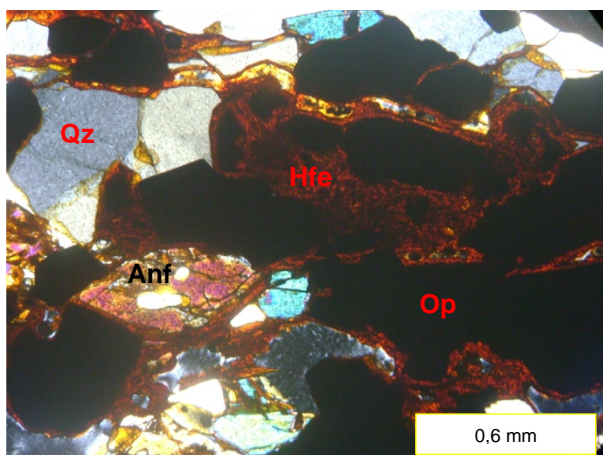


Figura 4.6 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis cruzados de formação ferrífera granular com intensa alteração hidrotermal e formação de hidróxidos de ferro (Hfe) substituindo minerais opacos (Op) e anfibólios (Anf), provavelmente grunerita. Amostra ML-542B.

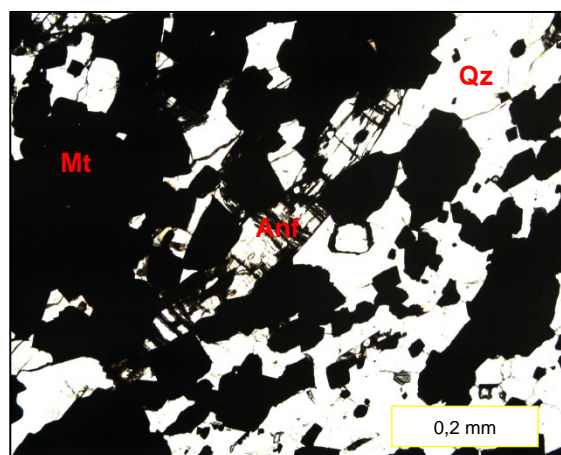


Figura 4.7 – Fotomicrografia de seção bipolida com luz transmitida plano-polarizada de formação ferrífera granular composta essencialmente por quartzo (Qz), magnetita (Mt) martitizada e prismas orientados de anfibólios (Anf). Amostra AR-R-217A.

A biotita (Figura 4.9) e apatita ocorrem como traço em apenas duas amostras do grupo de formações ferríferas granulares. A biotita é ripiforme, intergranular, com forte extinção ondulante, orientando-se na foliação principal da rocha, localmente sendo substituída por minerais opacos. Os tamanhos são inferiores a 0,3 mm de eixo maior. A apatita é xenomórfica a hipidomórfica, por vezes orientando-se na foliação principal, sofrendo por vezes microfissuramento.

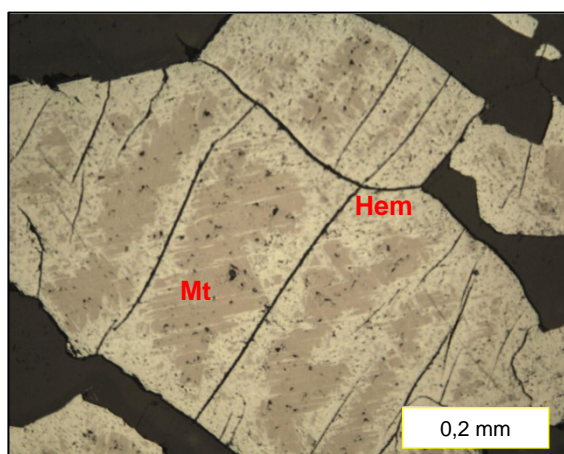


Figura 4.8 – Fotomicrografia de seção bipolida com luz refletida de cristais de magnetita (Mt) bastante transformados para hematita (Hem) nas bordas e ao longo de fraturas. A rocha é uma formação ferrífera granular. Amostra AR-R-217A.

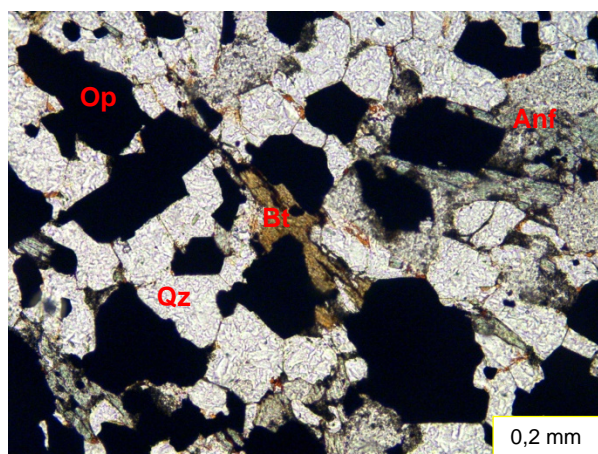


Figura 4.9 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando a biotita (Bt) marrom, com hábito planar, associada com minerais opacos (Op), anfibólio (Anf) e quartzo (Qz). Amostra RF-032.

Considerando as relações minerais observadas e discutidas, sugerem-se as seguintes assembleias em ordem cronológica, a partir da mais antiga:

- (1) Minerais opacos (magnetita) + quartzo + anfibólio + biotita + apatita (foliação)
- (2) Minerais opacos (magnetita + hematita) + quartzo + anfibólio (crescimento tardi- a pós-foliação)
- (3) Quartzo + minerais opacos (magnetita + hematita) (exsudados)
- (4) Hidróxidos de ferro (matriz e fissuramento).

4.3 – Rochas Ferríferas Bandadas

Macroscopicamente são rochas mesocráticas, de cor cinza escura a preta, finas a grossas, de estrutura foliada e bandada. O bandamento é milimétrico, do tipo claro (predominantemente quartzo) e escuro (minerais de ferro+quartzo). As bandas claras variam de 1 a 5 mm enquanto as bandas escuras apresentam de 1 a 3 mm em média. Por vezes os anfibólios estão mais concentrados em algumas faixas (figuras 4.10 e 4.11) formando bandas de coloração esverdeada, exibindo textura nematoblástica, enquanto as faixas mais ricas em quartzo ou minerais opacos exibem uma textura granoblástica (Figura 4.11). Apresentam dois grupos de formações ferríferas bandadas que diferem no maior ou menor percentual de anfibólios.

Em seção delgada, observa-se que as rochas ferríferas bandadas tem textura inequigranular e granonematoblástica, com granulometria dominante fina a média. São compostas essencialmente de quartzo, minerais opacos e anfibólios da série cummingtonita-grunerita e tremolita-actinolita. Ocorre estrutura foliada, bandada, alternando bandas quartzosas estiradas e deformadas com bandas ferríferas, finas a muito finas, além de bandas predominantemente anfibolíticas (figuras 4.11 e 4.12). A granulação é marcada ainda pela alternância de bandas de granulação fina, submilimétrica e bandas de granulação média (2-4 mm), sugerindo diferentes condições de deposição ao longo da história do sedimento. A recristalização de quartzo, o estiramento dos minerais opacos e a presença de exsudados de quartzo acompanhando a orientação, além da situação da rocha em um contexto geológico regional sugerem pelo menos condições de fácies xisto verde. Algumas amostras mostram dobras apertadas milimétricas a centimétricas (figuras 4.13, 4.14 e 4.15).

O quartzo (30-40%) é xenoblástico a idioblástico (figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13). Tem textura de ponto tríplice que atribui caráter granoblástico à rocha. Possui

muitas inclusões de minerais opacos, também sendo incluído por estes, evidenciando duas fases em intercrescimento. Frequentemente forma exudados longitudinalmente contínuos e paralelos à orientação preferencial da rocha. Quanto à granulação, não ultrapassa os 0,6 mm, porém nos exudados podem chegar a 1,7mm.

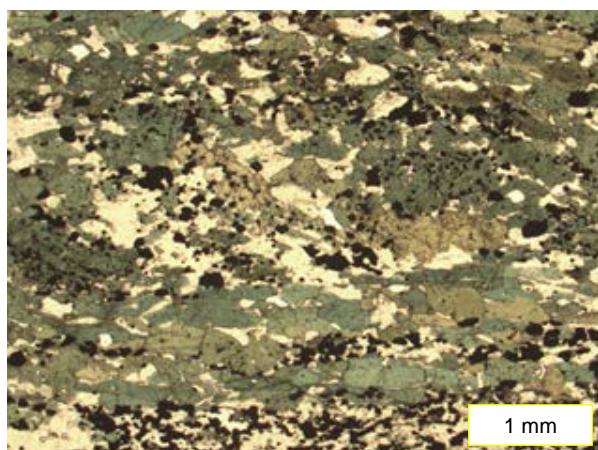


Figura 4.10 – Fotomicrografia de lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando os cristais de anfibólio presentes na formação ferrífera bandada, possivelmente da série cummingtonita-grunerita (minerais verde oliva e verde escuro). As bandas mais ricas em anfibólios também contêm quartzo e minerais opacos disseminados. Amostra AR-R-096.

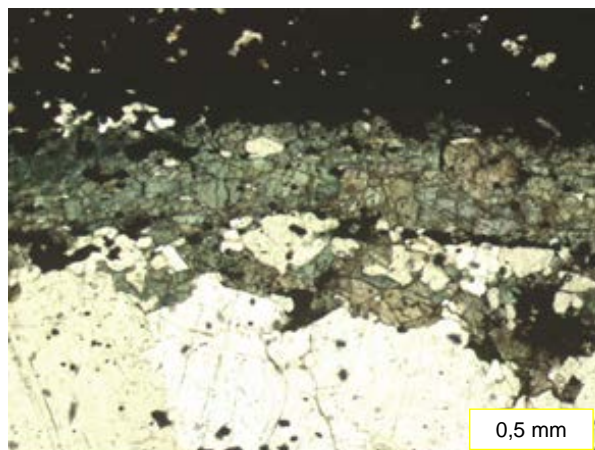


Figura 4.11 - Fotomicrografia de lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando os cristais de anfibólio presentes na formação ferrífera bandada (níveis milimétricos mais ricos em quartzo de cor branca, anfibólio de cores esverdeadas e minerais opacos de cor negra). As faixas de quartzo e opacos domina a textura granoblástica enquanto a faixas mais ricas em anfibólio exibe uma textura nematoblástica. Amostra AR-R-192A.

O anfibólio ocorre entre 20 e 30% em um grupo de amostras e em outro não ultrapassa 5% ou é ausente. As características microscópicas em ambos os casos são comuns. O mineral é sub-idioblástico a xenoblástico (figuras 4.10, 4.11 e 4.12), compondo cristais provavelmente da série cummingtonita-grunerita. Apresenta cores que variam de incolores a esverdeadas e desenvolve textura nematoblástica, assumindo um caráter sin e sin à tardi-foliação. É comum a relação de contato do anfibólio com as fases opacas. Os tamanhos não ultrapassam 1 mm no sentido do seu eixo maior.

Em algumas amostras a tremolita-actinolita pode representar a maioria dos anfibólios presentes, constituindo de 10 até 25% da composição modal da rocha. Tem cor verde azulada clara, idio ou subidiomórfica e tem seus prismas orientados segundo o bandamento. A tremolita-actinolita fibrosa pode ainda ocorrer intercrescida com cristais aciculares de grunerita incolor, com maclas polissintéticas, tanto em cristais

finíssimos situados em meio ao quartzo das bandas quartzosas, como em cristais de feixes maiores (até 1 mm de comprimento) junto às bandas de magnetita. Mostra alteração forte para material ferruginoso (goethita), particularmente ao longo das bordas e clivagens de alguns cristais.

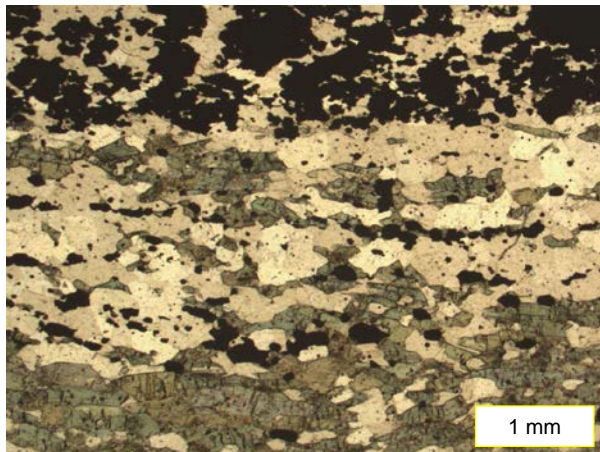


Figura 4.12 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis paralelos de formação ferrífera bandada, alternando banda milimétrica quartzosa de cor branca, anfibolítica de cor esverdeada e ferrífera de cor preta. Percebem-se níveis granulométricos de minerais opacos de tamanhos distintos (finos e muito finos, na parte superior e central da foto, respectivamente). As bandas são fortemente orientadas e alongadas na direção da foliação. Amostra AR-R-096.

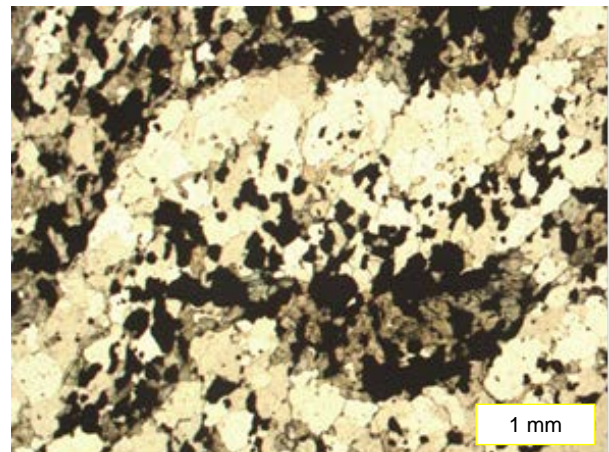


Figura 4.13 – Fotomicrografia em lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando a formação ferrífera bandada dobrada, alternando bandas quartzosas (minerais incolores ou brancos), anfibolíticas (minerais esverdeados) e ferríferas (minerais negros). Amostra AR-R-213.

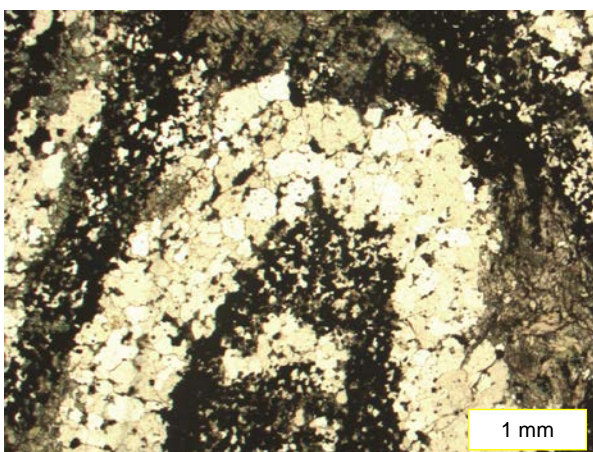


Figura 4.14 – Fotomicrografia de lâmina delgada e nicóis paralelos mostrando a formação ferrífera bandada, alternando bandas quartzosas, anfibolíticas e ferríferas dobradas. Amostra AR-R-192C.

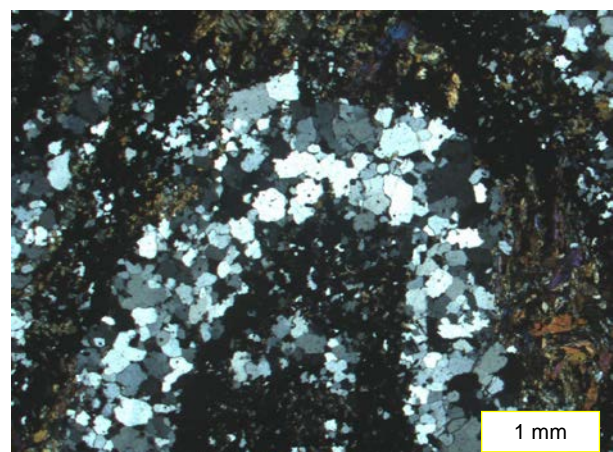


Figura 4.15 – Fotomicrografia de lâmina delgada e nicóis cruzados mostrando a formação ferrífera bandada, alternando bandas quartzosas, anfibolíticas e ferríferas dobradas. Amostra AR-R-192C.

Os minerais opacos (30-55%) são xenoblásticos a idioblásticos, com hábito por vezes lonsangular e quadrático, desenvolvendo textura nematoblástica. A textura granoblástica é comum em algumas amostras. Formam agregados e também ocorrem como cristais isolados, geralmente bem orientados e definindo a orientação preferencial da rocha. Apresentam grande variação granulométrica com dimensão máxima na ordem de 4 mm, como alguns porfiroclastos que apresentam-se parcialmente cominuídos por mecanismo de geração da foliação. Os cristais diminutos (~0,06 mm) intercrescidos com quartzo compõe as bandas ricas em ferro (Figura 4.16), mas também podem ocorrer como finas lâminas no interior de faixas mais quartzosas ou anfibolíticas (Figura 4.12). Geralmente os opacos englobam cristais de quartzo, transformando-se localmente para hidróxido de ferro. São observadas algumas fraturas preenchidas por óxidos ou hidróxidos de ferro (goethita), de cor avermelhada.

Hematita em quantidade um pouco maior que magnetita é o mineral opaco mais comum identificado nas seções polidas. Os cristais de magnetita mostram uma martitização moderada a forte (Figura 4.17), na forma de agulhas de hematita que invadem a magnetita a partir das bordas e se dispõem segundo as direções cristalográficas da magnetita.

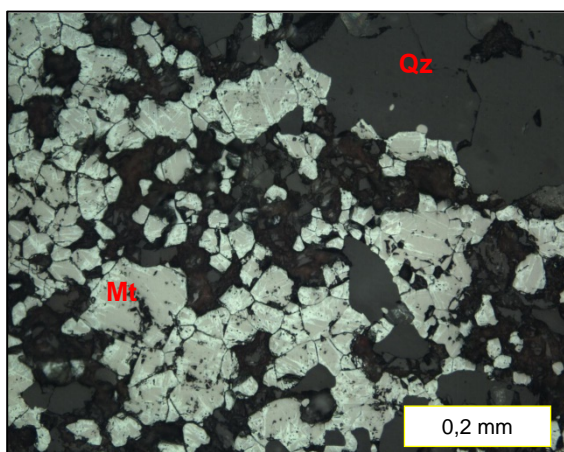


Figura 4.16 – Fotomicrografia de seção polida com luz refletida de formação ferrífera bandada composta essencialmente por quartzo (Qz) e magnetita (Mt) martitizada. Amostra AR-R-192C.

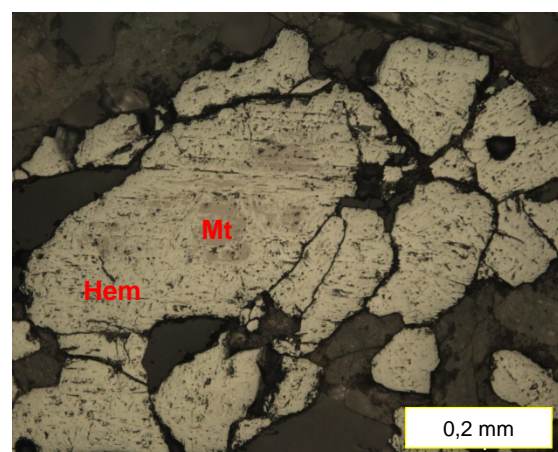


Figura 4.17 – Fotomicrografia de seção polida com luz refletida de cristais xenoblásticos de magnetita (Mt) fortemente martitizada, ou seja, transformada em hematita (Hem), em formação ferrífera bandada. Amostra AR-R-213.

As porções maciças de formações ferríferas bandadas chegam até 80% de minerais opacos, com menor proporção de quartzo (até 15%), anfibólio (5%) e

hidróxidos de ferro (< 1 %). Apresenta particularmente uma quantidade expressiva de hematita especular (especularita) (Figura 4.18), com menor proporção de magnetita, que ocorre associado ou incluso nesse mineral (Figura 4.19). Identifica-se no mínimo duas fases de cristalização de especularita quando a formação ferrífera está dobrada. Os cristais mais antigos alinham-se segundo a superfície Sn (níveis dobrados), enquanto os mais novos alinham-se segundo a superfície Sn+1 de plano axial (Figura 4.18).

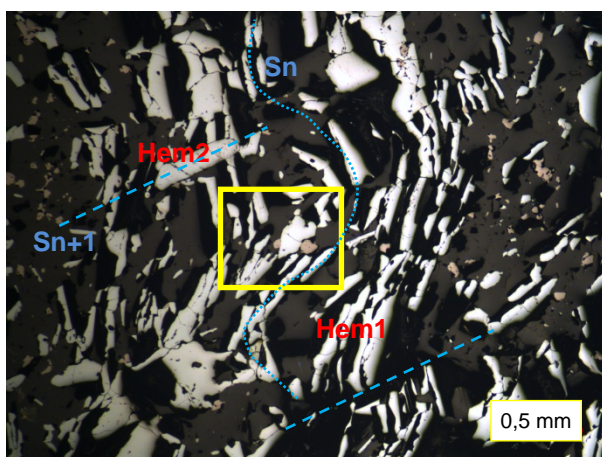


Figura 4.18 – Fotomicrografia de seção polida com luz refletida de formação ferrífera bandada rica em hematita especular em duas gerações de cristalização. A primeira está alinhada segundo a superfície Sn que está dobrada. A segunda está alinhada segundo a superfície de plano axial Sn+1. O polígono amarelo é o detalhe apresentado na foto 4.19. Amostra HS-007A da mina de Saquinho.

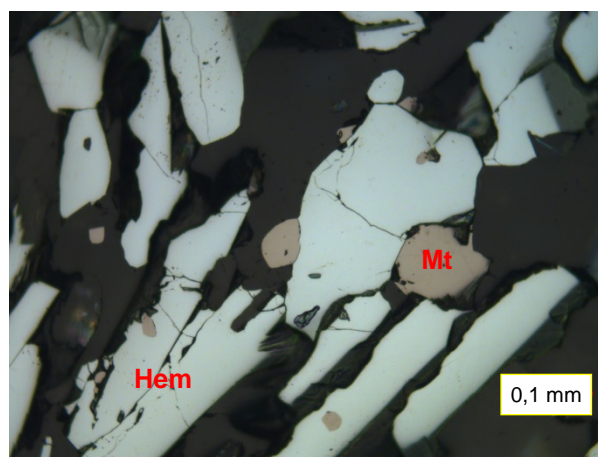


Figura 4.19 – Fotomicrografia de seção polida com luz refletida de cristais xenoblásticos de magnetita (Mt) associados ou inclusos em cristais de hematita especular (Hem). Amostra HS-007A da mina de Saquinho.

Associados aos minerais opacos observam-se estruturas avermelhadas de hábito acicular, orientadas ao longo da foliação, contato de fases minerais e no preenchimento de microfraturas. Provavelmente são hidróxidos de ferro (goethita) (< 2%) e argilominerais preenchendo planos de foliação.

A muscovita ocorre como mineral traço (< 1%). É ripiforme, ocorrendo localmente nos limites de grãos nos exudados de quartzo, acompanhando a orientação principal da rocha. Os tamanhos são inferiores a 0,15 mm. Apatitas medindo até 0,4 mm e epidoto amarelado muito fino são componentes raros.

Na amostra AR-021 foi observado até 20% de microclínio, em cristais idio a xenoblásticos, de até 1,8 mm. O mineral exibe maclas em xadrez mal definidas e

apresenta leve alteração para argilo-minerais e impregnação por hidróxido de ferro (goethita) ao longo das bordas e clivagens. Provavelmente corresponde a uma formação ferrífera com maior aporte de terrígenos.

Considerando as relações minerais observadas e discutidas, sugerem-se as seguintes assembleias em ordem cronológica, a partir da mais antiga:

- (1) Minerais opacos (magnetita + hematita) + quartzo + anfibólios + muscovita (foliação Sn)
- (2) Minerais opacos (magnetita + hematita) + quartzo + anfibólios (plano axial Sn+1)
- (3) Quartzo + Minerais opacos (magnetita + hematita) (exsudados)
- (4) Hidróxidos de ferro (fissuramento e intemperismo ?).

Para as formações ferríferas bandadas sem presença de anfibólios, desconsiderá-los nas relações acima. Porém para os outros minerais, as relações são comuns a ambos os tipos litológicos.

4.4 – Análises de MEV e EDS

Com o intuito de obter a composição química de alguns anfibólios e magnetitas ou hematitas observadas em seções polidas e lâminas bipolidas de formações ferríferas granulares e bandadas foi realizada algumas análises semiquantitativas utilizando-se o MEV (microscópio eletrônico de varredura) e EDS (sistema de energia dispersiva).

Basicamente cada análise de MEV produz uma imagem do mapeamento dos espectros de raios-X característicos de cada elemento químico da amostra. Os sinais estáveis dos elétrons retroespalhados (BSE) condicionam a geração de uma imagem para cada grão mineral e sua identificação é realizada através do parâmetro brilho BSE, que segue uma escala de cinzas com valores entre 0 (0 % BSE) e 256 (100 % BSE). As variações da escala de cinzas fornecem um rápido e eficaz método de distinção de limites entre os grãos minerais, valorizando-se por proporcionar uma identificação primária da ordem mineral (figuras 4.20A e 4.21A). Por exemplo, os minerais compostos de elementos mais pesados (por exemplo, o zircão) tem um maior retroespalhamento dos elétrons incidentes do MEV e aparecem mais brilhantes na imagem BSE, enquanto que os minerais compostos de elementos mais leves (por

exemplo, o quartzo) tem um menor retroespalhamento de elétrons e aparecem mais escuros (Fandrich et al., 2007).

A coleta da imagem de BSE no MEV e dos espectros de raio X no EDS é efetuada em etapas subsequentes. O gerenciamento, processamento e apresentação dos dados (figuras 4.20 e 4.21) são gerenciados pelos softwares (Hitachi TM 3000 e Quantax 70) do fabricante do equipamento. A imagem de BSE é gerada no Hitachi TM 3000 e os espectros de raio X são analisados no Quantax 70, através de mapeamento elementar e espectrograma, que também pode ser apresentado em forma de tabela.

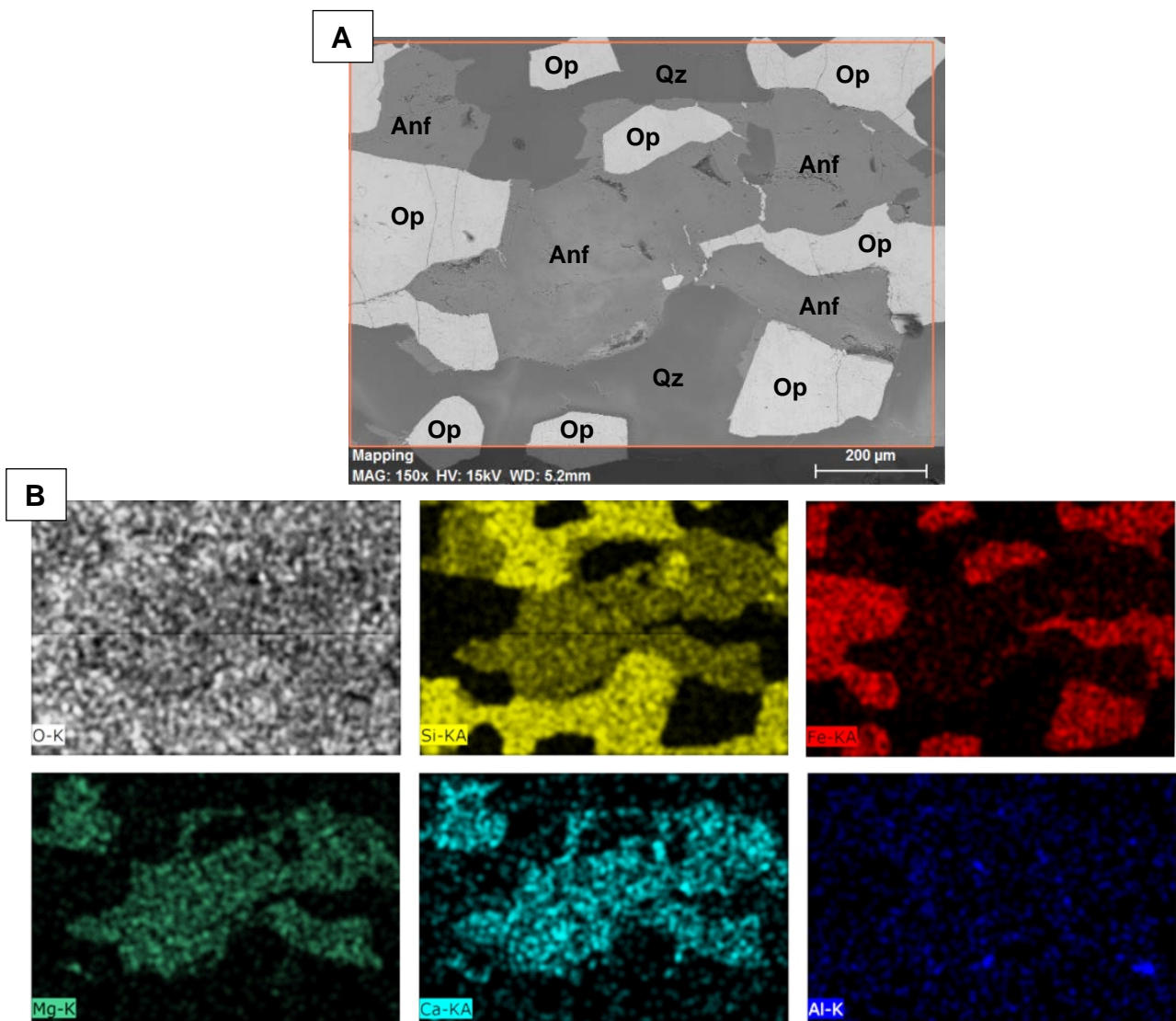


Figura 4.20 – Apresentação dos dados de MEV e EDS para a amostra AR-012 de formação ferrífera granular. Em (A) observa-se a imagem em tons de cinza dos elétrons retroespalhados (BSE) produzida no MEV. Os cristais de quartzo (Qz) tem tonalidade de cinza mais escura, os anfibólios (Anf) apresentam um cinza intermediário e os óxidos de ferro (Op) tem tonalidade cinza clara. (B) representa o mapeamento elementar individual gerado pelo EDS. No caso da amostra analisada é possível observar imagens dos seis elementos químicos identificados separadamente. Os óxidos de ferro têm seus contornos facilmente marcados no mapa elementar do Fe em vermelho. O quartzo é evidente em tons

amarelos no mapa elementar da Si. Os anfibólios são melhores identificados nos mapas do Ca e Mg. Considerar que a maior abundância elementar está representada pelas tonalidades de cores mais claras.

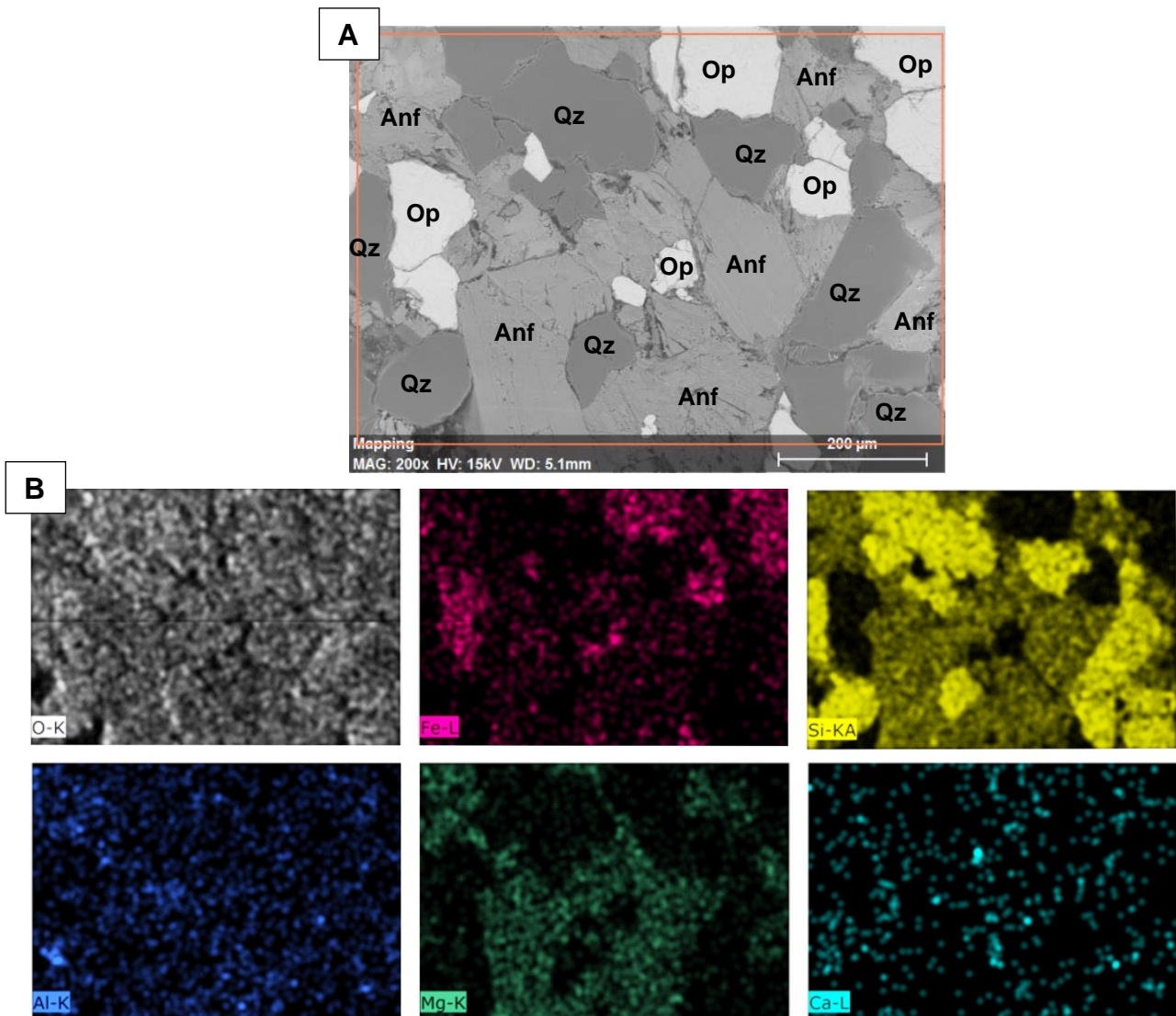


Figura 4.21 – Apresentação dos dados de MEV e EDS para a amostra AR-213 de formação ferrífera bandada. Em (A) observa-se a imagem em tons de cinza dos elétrons retroespalhados (BSE) produzida no MEV. Os cristais de quartzo (Qz) tem tonalidade de cinza mais escura, os anfibólios (Anf) apresentam um cinza intermediário e os óxidos de ferro (Op) tem tonalidade cinza clara. B) representa o mapeamento por elemento individual gerado pelo EDS. No caso da amostra analisada é possível observar imagens dos seis elementos químicos identificados separadamente. Os óxidos de ferro têm seus contornos facilmente marcados no mapa elementar do Fe em rosa. O quartzo é evidente em tons amarelos no mapa elementar da Si. Os anfibólios são melhor identificados no mapa do Mg. Considerar que a maior abundância elementar está representada pelas tonalidades de cores mais claras.

A partir da imagem de BSE, já no sistema EDS, é gerado um mapeamento que mostra a distribuição dos principais elementos que constituem os minerais que estão sendo observados naquela escala de observação. São utilizadas as cores do sistema RGB. Nesse momento já é possível ter uma visualização qualitativa da composição

química dos minerais. A mesma imagem de mapeamento elementar pode ser apresentada em intensidade de brilho para cada elemento químico mapeado individualmente utilizando uma cor específica pré-determinada pelo usuário (figuras 4.20B e 4.21B).

Em seguida ocorre a seleção dos pontos para realizar a medição da composição do anfibólio e do óxido de ferro (magnetita/hematita) que está disponível no campo de visualização do equipamento (figuras 4.22 e 4.23). Em alguns casos foi necessário realizar o aumento da imagem para uma melhor qualidade do dado, incluindo o diâmetro do círculo de leitura no interior do mineral analisado, garantindo uma melhor calibração do equipamento durante a medição, sem influencia dos minerais que estão em contato nas bordas. Após dado o comando de análise e aguardando o tempo de 45 segundos para leitura, é gerado um espectrograma (figuras 4.22B e 4.23B) que mostra os picos de energia gerados para cada elemento químico específico. Em seguida é apresentado o dado em forma de tabela com percentagem em peso da concentração efetiva do elemento, a concentração normatizada (100%), além do erro analítico individual para cada elemento (figuras 4.22C e 4.23C).

Para as amostras analisadas de formações ferríferas foram obtidas imagens de MEV dos elétrons retroespalhados (BSE) dos três minerais essenciais que ocorrem nas rochas ferríferas da área de estudo. Os cristais de óxidos de ferro (magnetita ou hematita) apresentaram tons de cinza claro, os cristais de anfibólios com cor cinza de tom intermediário e os cristais de quartzo com tom de cinza escuro. Os resultados analíticos semiquantitativos do EDS permitiram a geração da tabela 4.1 de composição química por elemento, com a disposição dos dados de concentração elementar em percentagem de peso de anfibólios, óxidos de ferro e anfibólios alterados com hidróxidos de ferro, todos agrupados em formações ferríferas granulares ou bandadas. O EDS não diferencia os óxidos de ferro (magnetita e hematita).

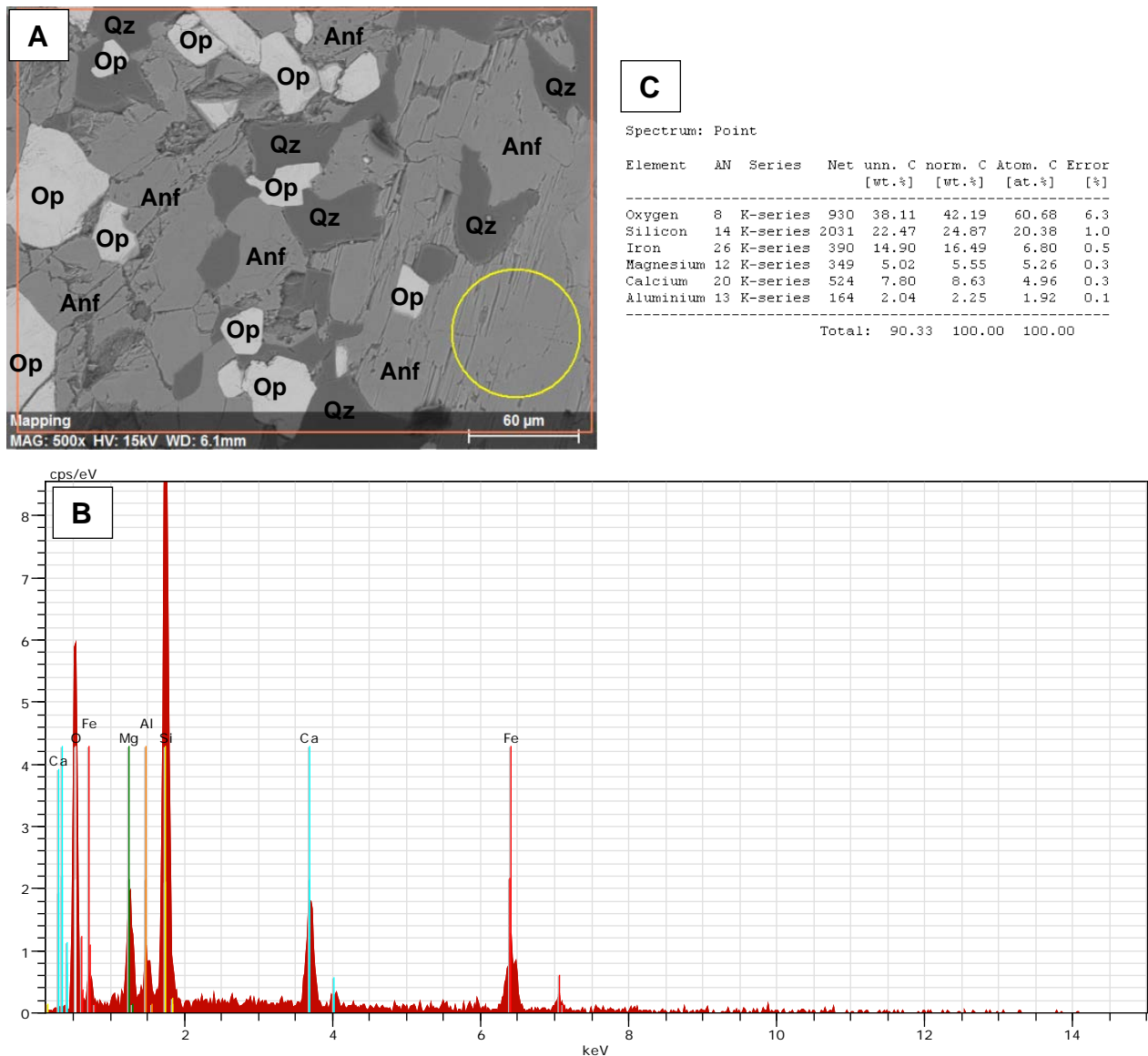


Figura 4.22 – Análise com EDS da química mineral do cristal 2 de anfibólio na amostra AR-192C de formação ferrífera bandada. Em (A) observa-se a imagem em tons de cinza dos elétrons retroespalhados (BSE) produzida no MEV. O círculo amarelo corresponde à área de leitura da química mineral. Os cristais de quartzo (Qz) tem tonalidade de cinza mais escura, os anfibólios (Anf) apresentam um cinza intermediário e os óxidos de ferro (Op) tem tonalidade cinza clara. Em (B) é apresentado o espectrograma por energia dispersiva com a ordem dos elementos para os picos da série K e L, como resposta da leitura da área do círculo amarelo em (A). (C) corresponde à tabela com o resultado da química mineral lida na região do círculo amarelo em (A). O dado utilizado é o de concentração normalizada (100%) em percentagem de peso (C norm. [wt.%]).

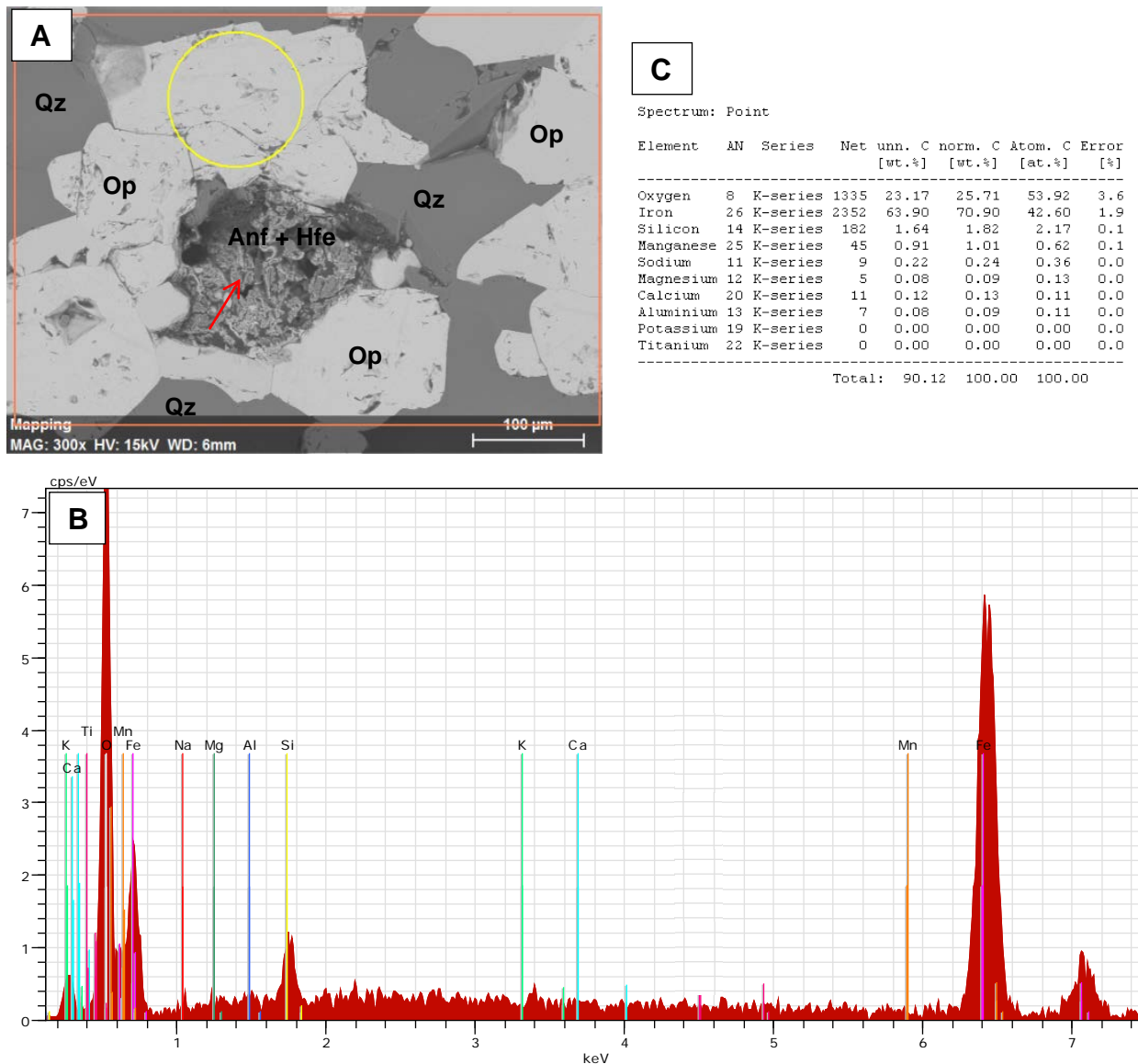


Figura 4.23 – Análise com EDS da química mineral de cristal de óxido de ferro (magnetita/hematita) na amostra RF-035 de formação ferrífera granular. Em (A) observa-se a imagem em tons de cinza dos elétrons retroespalhados (BSE) produzida no MEV. O círculo amarelo corresponde à área de leitura da química mineral. Os cristais de quartzo (Qz) têm tonalidade de cinza mais escura e os óxidos de ferro tem tonalidade cinza clara (Op). A massa mineral indicada pela seta vermelha corresponde a anfibólio (Anf) com hidróxidos de ferro (Hfe). Em (B) é apresentado o espectrograma por energia dispersiva com a ordem dos elementos para os picos da série K e L, como resposta da leitura da área do círculo amarelo em (A). (C) corresponde à tabela com o resultado da química mineral lida na região do círculo amarelo em (A). O dado utilizado é o de concentração normalizada (100%) em percentagem de peso (C norm. [wt.%]).

Tabela 4.1: Resultado da química elementar semiquantitativa de cristais de anfibólios, anfibólios alterados com hidróxidos de ferro (hidrox fe) e óxidos de ferro (magnetita ou hematita – Mag/Hem) adquirido no EDS para rochas ferríferas granulares e bandadas da área de estudo. Dados em concentração normalizada em porcentagem de peso.

Fm. Ferrífera	Amostra	Mineral	Concentração normalizada em porcentagem de peso [wt.%]										Total		
			O	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K			
Granular	AR-012	Anfibolio - Cristal 1	43,60	26,60		0,77	10,30			10,12	8,60				100
Granular	AR-012	Anfibolio - Cristal 2	44,01	26,30		0,72	9,37			8,98	10,63				100
Granular	AR-217A	Anfibolio - Cristal 1	39,92	23,69		0,49	25,80	1,76		7,53	0,65	0,14	0,03		100
Granular	AR-217A	Anfibolio - Cristal 2	41,11	16,60		0,17	15,37	3,23			19,49	0,06	3,97		100
Bandada	AR-192C	Anfibolio - Cristal 1	43,00	33,29		5,28	14,32			1,93	2,18				100
Bandada	AR-192C	Anfibolio - Cristal 2	42,19	24,87		2,25	16,49			5,55	8,63				100
Bandada	AR-213	Anfibolio - Cristal 1	42,17	24,15	0,44	0,90	17,07	0,85		6,34	7,82	0,16	0,10		100
Bandada	AR-213	Anfibolio - Cristal 2	40,31	19,59	2,89	0,41	15,15	2,88		3,04	12,34	0,26	3,13		100
Granular	AR-012	Anfibolio + hidrox fe	36,00	19,38		1,56	40,25			1,90	0,92				100
Granular	AR-217A	Anfibolio + hidrox fe	42,04	23,71		0,56	31,11	1,25			0,69	0,33	0,30		100
Granular	RF-035	Anfibolio + hidrox fe	38,87	12,64		4,13	41,56	0,71		0,63	0,68	0,47	0,30		100
Granular	AR-012	Mag/Hem - Cristal 1	28,25	1,18			70,24			0,28	0,05				100
Granular	AR-012	Mag/Hem - Cristal 2	28,00	1,65		0,18	69,84			0,33					100
Granular	AR-217A	Mag/Hem	27,41	1,36		0,15	68,72	1,08			0,62	0,43	0,23		100
Granular	RF-035	Mag/Hem	25,71	1,82		0,09	70,90	1,01		0,09	0,13	0,24			100
Bandada	AR-192C	Mag/Hem - Cristal 1	29,60	1,72		0,12	68,49				0,06				100
Bandada	AR-192C	Mag/Hem - Cristal 2	30,15	2,56		0,18	66,24			0,56	0,31				100
Bandada	AR-213	Mag/Hem	32,23	1,68	0,01	0,17	64,70	0,87		0,26	0,07				100
Bandada	HS-007A	Mag/Hem	23,20	0,80	0,29	0,75	72,93	1,08		0,02	0,00	0,47	0,45		100

Para melhor interpretação dos dados de EDS foi realizada a estequiometria dos resultados, transformando os dados elementares em óxidos. Os anfibólios foram normalizados para 23 oxigênios e classificados de acordo com a ocupação dos seus sítios iônicos. Posteriormente foram classificados segundo quantidade de íons de sílica (Si), razão $Mg/(Fe^{+2}+Mg)$ e a soma dos íons de cálcio (Ca) e sódio (Na) na posição B da fórmula padrão dos anfibólios de acordo com Leake et al. (1997).

A tabela 4.2 apresenta a classificação para os anfibólios analisados na tabela 4.1. Os resultados apresentados ainda foram corroborados com o banco de dados de espectrogramas de espécies minerais brasileiras em Sampaio (2016), além da composição química mineral constante no site Webmineral (<http://www.webmineral.com/>), que contém mais 4700 registros de espécimes minerais.

Tabela 4.2: Resultado da classificação dos anfibólios segundo Leake et al. (1997) obtidos a partir da análise química elementar semiquantitativa de cristais de anfibólios adquirida no EDS para rochas ferríferas granulares e bandadas da área de estudo.

Fm. Ferrífera	Amostra	Mineral	Classificação de anfibólios de Leake et al. (1997)
Granular	AR-012	Anfibolio - Cristal 1	Actinolita
Granular	AR-012	Anfibolio - Cristal 2	Actinolita
Granular	AR-217A	Anfibolio - Cristal 1	grunerita manganésifera
Granular	AR-217A	Anfibolio - Cristal 2	ferro-edenita potássica
Bandada	AR-192C	Anfibolio - Cristal 1	Ferroholmquistite (?)
Bandada	AR-192C	Anfibolio - Cristal 2	ferro-actinolita
Bandada	AR-213	Anfibolio - Cristal 1	ferro-actinolita
Bandada	AR-213	Anfibolio - Cristal 2	ferro-edenita manganésifera-tinanífera-potássica

Através da química mineral não foi possível caracterizar grupos de formações ferríferas. Em ambas, formações ferríferas granulares e bandadas, ocorrem anfibólios cálcicos (actinolita, ferro-actinolita e ferro-edenita), com menor proporção de anfibólios ferromagnesianos e manganésiferos (grunerita). Apenas o cristal 1 da amostra AR-192C não aplicou-se a classificação de Leake et al. (1997), porém sua composição química é muito próxima da ferroholmquistita, como consultado no Webmineral, mas não foi identificado lítio em sua composição, que é um elemento presente nesse mineral. Porém o EDS não faz a leitura deste elemento químico pois ele apresenta um número atômico baixo, não detectável por esta técnica (Dedavid et al. 2007).

Os anfibólios alterados com hidróxido de ferro (Figura 4.23A e tabela 4.1) não foram classificados, mas percebe-se claramente o enriquecimento de ferro provocado por alterações minerais, com o crescimento de hidróxido de ferro, em comparação com a química mineral apresentada pelos anfibólios não alterados.

As magnetitas em ambas as rochas apresentam composição similar, com muito baixo percentual de sílica e traços de alumínio, magnésio, cálcio e muito pouco manganês, titânio, sódio e potássio. É muito provável que a origem do alumínio, magnésio, cálcio e potássio seja de inclusões minerais ou fissuras no interior das magnetitas.

4.5 – Associações Minerais e Paragênese

Na região das áreas de estudo, considerando a mineralogia, textura, estrutura e composição química já discutida em itens anteriores deste capítulo, as rochas ferríferas apresentam composição relativamente simples, dominando principalmente quartzo, magnetita, hematita e anfibólios. A tabela 4.3 apresenta um quadro resumo com as características principais dos dois grupos de rochas (granular e bandada). Nas rochas ferríferas granulares normalmente é menor o percentual de anfibólios em comparação com as rochas ferríferas bandadas, que apresentam um percentual mais variado. Dentre as características mineralógicas apresentadas, percebe-se que os dois grupos de rochas ferríferas podem ainda ser divididas em mais duas fácies com relação à mineralogia (James 1954): formação ferrífera granular fácies óxido, formação ferrífera granular fácies óxido-silicato, formação ferrífera bandada fácies óxido e formação ferrífera bandada fácies óxido-silicato. A terminologia óxido-silicato não é contemplada na classificação de James (1954), mas já foi adotada em alguns trabalhos (Fernandes et al. 2003, 2004) quando a rocha apresenta características mineralógicas dessas duas fácies de rocha ferrífera. Raposo (1996) faz referência a uma ocorrência de formação ferrífera metamórfica fácies óxido com uma forte componente silicática para um tipo litológico com grunerita como um dos constituintes essenciais da rocha. Essa característica também é observada nas rochas ferríferas granulares e bandadas estudadas neste trabalho.

As associações minerais observadas são comuns aos dois grupos de rochas estudados. O crescimento de cristais de quartzo ocorre associado a cristais de magnetita e anfibólios, mesmo quando o bandamento milimétrico típico da formação ferrífera bandada mostra a concentração de níveis mais ricos em quartzo, minerais opacos (magnetita e hematita) e anfibólios intercalados. As relações de inclusões minerais são variadas, pois esses três minerais (quartzo, opacos e anfibólios) ocorrem como inclusões uns dos outros, indicando um crescimento contínuo durante o metamorfismo.

Considerando a natureza isoquímica do comportamento das formações ferríferas durante o metamorfismo, com perda apenas de voláteis (Klein 1983) em reações de desidratação e descarbonatação (Klein 2005), as rochas ferríferas da região central do Rio Grande do Norte apresentam associações minerais de rochas

ferríferas de grau metamórfico médio. Nesse caso em temperaturas que variam de 450 até 550°C e pressões que variam de 2 até 5 kbar (James 1955, Haase 1982a).

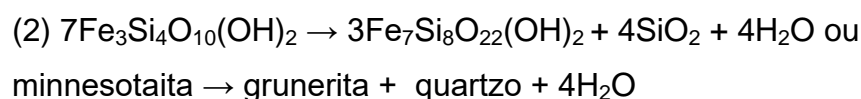
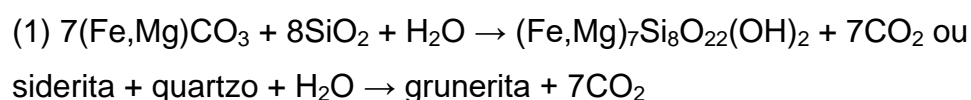
Tabela 4.3: Quadro resumo com os principais minerais constituintes, textura e estrutura microscópica das rochas ferríferas da área de estudo.

Rocha ferrífera	Mineralogia	Minerais opacos	Estrutura/ Textura
Formação ferrífera granular fácies óxido*	quartzo (45-55%) opacos (40-45%) anfíbólios (5-10%) (tremolita-actinolita e cummingtonita-grunerita)	hematita* > magnetita *A hematita é predominantemente produto de martitização	Textura dominante granoblástica. Presença de anfíbólios denota localmente uma textura nematoblástica. Granulação fina a média. Sem bandamento característico, com estrutura maciça. Normalmente apresenta foliação penetrativa.
*Predomínio	hidróxidos de ferro (<5%)		
Formação ferrífera granular fácies óxido-silicato**	quartzo (35-40%) opacos (40-45%) anfíbólios (15-25%) (cummingtonita-grunerita)	hematita* ± magnetita *a hematita é predominantemente produto de martitização	Textura nematogranoblástica e granulação fina a média predominantemente. Rocha de aspecto maciço com foliação variando de pouco desenvolvida a penetrativa.
**Pouco frequente	hidróxidos de ferro (até 5%)		
Formação ferrífera bandada fácies óxido	quartzo (45-55%) opacos (45-55%) anfíbólios (até 5%) (cummingtonita-grunerita)	hematita* > magnetita *Menor proporção de hematita é produto de martitização. Domina especularita.	Textura granonematoblástica de granulação fina a média. Apresenta micro e mesobandamento, com alternância de bandas milimétricas esbranquiçadas e pretas.
Formação ferrífera bandada fácies óxido-silicato	quartzo (30-45%) opacos (30-40%) anfíbólios (20-30%) (tremolita-actinolita e cummingtonita-grunerita)	hematita* ± magnetita *a hematita é predominantemente produto de martitização	Textura granonematoblástica, menos frequentemente inequiangular. Granulação fina a média. Apresenta micro e mesobandamento, com alternância de bandas milimétricas esbranquiçadas e pretas predominantemente, com esverdeadas menos frequentes.
	hidróxidos de ferro (<2%)		

Para as rochas ferríferas o quartzo, a magnetita e a hematita apenas se recristalizam e aumentam os tamanhos dos cristais com as condições crescentes de temperatura e pressão (James 1954, Klein 1973). Raposo (1996) afirma que as formações ferríferas não têm o mesmo comportamento que as rochas argilosas quando submetidas a elevações de temperatura e pressão, sobretudo nas faixas de temperaturas mais baixas. Alguns tipos, como os da fácies óxido, subfácies magnetita, constituídas essencialmente ou inteiramente por quartzo e magnetita, não sofrem nenhuma transformação mineralógica com o metamorfismo progressivo. Ocorre apenas um aumento do tamanho dos cristais de quartzo e magnetita. James (1955), Gross (1961) e Dorr (1964) utilizaram a dimensão média dos cristais de quartzo para definir o grau do metamorfismo nessas rochas. Nas zonas de baixo grau metamórfico

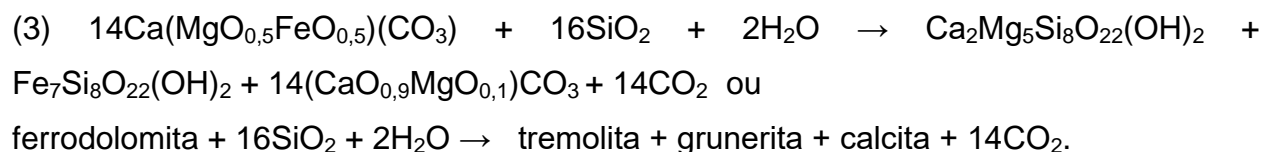
(zona da clorita), os cristais de quartzo são sempre menores que 0,1 mm, nas zonas de grau médio (zonas da granada e da estaurolita) variam de 0,1 a 0,2 mm e nas zonas de alto grau (zona da sillimanita) o tamanho dos cristais é sempre maior que 0,2 mm. Para Dorr (1964), o tamanho dos cristais daquelas rochas da fácies xisto verde à fácies granada-anfibolito, varia de 0,01 mm a 0,5 mm.

No caso dos anfibólios, Klein (1983, 2005) apresenta algumas reações minerais desde a diagênese até graus metamórficos mais altos, baseados em vários autores que estudaram litotipos ferríferos em diversas condições metamórficas e alguns poucos que preservaram a rocha sedimentar original, além de dados experimentais em condições atmosféricas. Na área de estudo duas possibilidades de reações minerais permitiriam a ocorrência de anfibólios ricos em Fe e Mg (série cummingtonita-grunerita) resultantes de reações metamórficas entre carbonatos de ferro e quartzo ou produto de reação de minnesotaita:



Para Klein (2005) os materiais precursores dos produtos sedimentares originais mais prováveis foram géis de composição Fe-silicato hidratado do tipo greenalita, géis de sódio e potássio hidratado, com conteúdo de Al que se aproxima das composições do estilpnomelano, géis de SiO₂, precipitados de Fe(OH)₂ e Fe(OH)₃ e carbonatos de granulação muito fina e composição variável. Com base nisso, é possível a participação de siderita na formação de gruneritas no caso da reação 1, bem como a minnesotaita na reação 2, que pode ser um mineral produto do estilpnomelano e greenalita na evolução do metamorfismo progressivo. Ambos minerais encontrados em rochas ferríferas no final da diagênese e em grau metamórfico baixo.

Klein (1983) cita vários autores que reportam o intercrescimento comum de anfibólios cálcicos com anfibólios de Fe-Mg. Nesse caso os Ca-anfibólios devem ser livres de Al e a tremolita-ferroactinolita deve apresentar baixo Al₂O₃ e Na₂O. Essa associação é possível com a seguinte reação:



Ocorrência de minerais membros das séries cummingtonita-grunerita e tremolita-actinolita ocorre em associação, tanto nas formações ferríferas bandadas como nas formações ferríferas granulares da região central da Faixa Seridó. Como apresentado na reação metamórfica 3 esse tipo de associação é comum em rochas ferríferas quando as rochas pretéritas apresentam carbonato. Haase (1982b) através de estudos analíticos afirma que essas assembleias de coexistência de actinolita e grunerita ocorrem em médio grau metamórfico (400-500°C) e na presença de fluidos ricos em água e CO₂.

Grande parte da hematita nas rochas estudadas ocorre como produto de martitização. Para Ramdohr (1969) este processo ocorre preferencialmente em função de agentes intempéricos, como sugerido pela alteração mais intensa das bordas para o centro do grão e ao longo dos planos de clivagem e fraturas, através da “invasão” de finas lamelas de hematita ao longo dos planos octaédricos da magnetita. No entanto, deve-se considerar a importância da deformação, principalmente de carácter rúptil, que possibilita o fraturamento dos grãos, facilitando a percolação de fluídos envolvidos neste processo.

A presença escassa de hidróxidos de ferro, como goethita, por exemplo, denota a ideia de que as alterações intempéricas não foram muito atuantes na região. Sendo assim, essas hematitas das rochas ferríferas da região central do Rio Grande do Norte, especificamente produto de martitização, podem ser relatadas não como evidência de lixiviação. Klein (1983) sugere que essa substituição ocorre durante metamorfismo regional e que não está relacionada com posterior oxidação supergênica de minérios de ferro. Halos de hidróxidos de ferro ocorrem em pouca proporção, envolvendo os cristais de quartzo, opacos (magnetita e hematita) e anfibólios.

Após essas discussões sobre a cristalização mineral em rochas ferríferas desde diagênese até condições metamórficas de médio grau (fácies xisto verde e anfibolito), considerando as espécies minerais, abundâncias e as relações entre eles, em condições de metamorfismo e pós-metamorfismo (hidrotermalismo ou intemperismo),

foi possível sugerir uma paragênese mineral (Tabela 4.4) para os dois grupos de rochas ferríferas da área de estudo.

Tabela 4.4: Sequência paragenética hipotética para os minerais essenciais das rochas ferríferas das áreas de estudo. (*) Os eventos de pós-metamorfismo podem incluir hidrotermalismo ou intemperismo.

Mineralogia	Metamorfismo	Pós-metamorfismo*
Formação ferrífera granular		
Quartzo	-----	-----
Magnetita	-----	
Hematita	-----	-----
Cummingtonita-grunerita	-----	
Tremolita-actinolita	-----	
Hidróxidos de ferro		-----
Formação ferrífera bandada		
Quartzo	-----	-----
Magnetita 1	-----	
Magnetita 2	-----	
Hematita 1	-----	-----
Hematita 2	-----	-----
Cummingtonita-grunerita 1	-----	
Cummingtonita-grunerita 2	-----	
Tremolita-actinolita 1	-----	
Tremolita-actinolita 2	-----	
Hidróxidos de ferro		-----

Em ambos os tipos de rocha (formação ferrífera granular e bandada) existe estreita relação no crescimento simultâneo de quartzo, magnetita e anfibólios (membros da série cummingtonita-grunerita e tremolita-actinolita). Hematita como produto de martitização provavelmente foi originada durante a evolução do metamorfismo à medida que água foi liberada nas reações metamórficas. No caso das formações ferríferas bandadas foi possível observar uma segunda geração de magnetita, hematita e anfibólios da série cummingtonita-grunerita e tremolita-actinolita cristalizados paralelos aos planos axiais de dobras geradas durante o metamorfismo progressivo que atingiu as áreas de estudo (Figura 4.24).

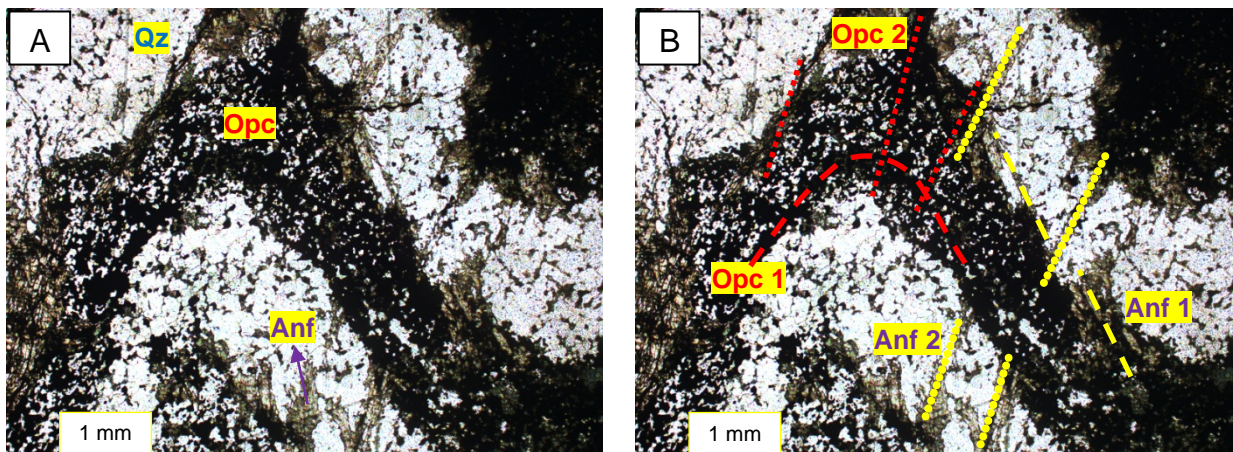


Figura 4.24 – Fotomicrografia com nicóis paralelos de lâmina delgada de formação ferrífera bandada (amostra AR-R-192C). (A) Observa-se os níveis mais ricos em minerais opacos (Opc) de cor preta e níveis mais ricos em quartzo (Qz) de cor esbranquiçada. Os anfibólios (Anf) são os minerais alongados de cores cinza a esverdeadas. Os opacos correspondem a cristais de magnetita e os anfibólios correspondem a cristais de ferro actinolita. (B) Observa-se a mesma fotomicrografia de (A) com a interpretação de duas gerações de minerais opacos (magnetitas): Opc 1 (linha tracejada vermelha) e Opc 2 (linha pontilhada vermelha); além das duas gerações de anfibólios: Anf 1 (linha tracejada amarela) e Anf 2 (linha pontilhada amarela).

Capítulo 5

Capítulo 5 – Litoquímica das Formações Ferríferas

5.1 – Introdução

Para análise dos dados de química das rochas ferríferas nas áreas de estudo (polígonos nordeste e sudoeste) foi utilizado um grupo de 17 amostras, conforme Tabela 5.1. A amostra RF-089A da mina de Saquinho é de uma porção de minério de ferro maciço (>67% de Fe) do pacote de formação ferrífera bandada.

O principal objetivo em utilizar a litoquímica é estudar o comportamento elementar das formações ferríferas granulares e bandadas, encaixadas nas rochas do Complexo Caicó e Formação Jucurutu, respectivamente, buscando suas similaridades ou diferenças. Nesse sentido, os gráficos apresentados serão divididos em formações ferríferas granulares e bandadas.

Tabela 5.1 – Grupo de amostras analisadas no tratamento de dados geoquímicos no contexto da textura da rocha, da litoestratigrafia da rocha encaixante (CC – Complexo Caicó; FJ – Formação Jucurutu) e das áreas de estudo na Faixa Seridó.

Textura da rocha	Encaixante	Área de estudo	Amostras				
Granular	CC	Sudoeste	RF-032	EL-16A	ML-542B	RF-035	
Bandada	FJ	Sudoeste	RF-086	RF-089A	RF-089B	RF-102	RF-105
Granular	CC	Nordeste	AR-012	AR-217	AR-220		
Bandada	FJ	Nordeste	AR-021	AR-096	AR-192A	AR-192C	AR-213

5.2 – Litoquímica dos Elementos Maiores

O conjunto de dados (Tabela 5.2) dos elementos maiores (óxidos) está representado no gráfico de elementos maiores em escala logarítmica (Figura 5.1). Também foi realizada a comparação da média dos óxidos de rochas ferríferas das áreas de estudo, com a média dos tipos Algoma, Lago Superior e Rapitan do Canadá.

Na figura 5.1 Os dados seguem a tendência das formações ferríferas do Canadá, com a composição maior que 90% de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T} + \text{SiO}_2$. Al_2O_3 , MgO e CaO ocorrem entre valores muito baixos até próximo de 3%. Os óxidos TiO_2 , MnO, Na_2O , K_2O e P_2O_5 ocorrem com um percentual menor que 1%. Somente a amostra AR-021 (Figura 5.1B) apresentou teor de K_2O (1,6%) maior que os tipos genéticos do Canadá e

a amostra RF-089A (Figura 5.1B), de minério de ferro maciço, tem baixa SiO_2 e muito alto Fe_2O_{3T} .

Tabela 5.2 - Análises químicas dos elementos maiores das rochas ferríferas granulares e bandadas, encaixadas no Complexo Caicó e nas rochas da Formação Jucurutu nas áreas de estudo.

Amostra	EL-16A	ML-542B	RF-032	RF-035	AR-012	AR-217	AR-220	RF-086	RF-089B	RF-102	RF-105	AR-021	AR-096	AR-192A	AR-192C	AR-213	RF-089A
Valor em %	Rochas ferríferas granulares (Complexo Caicó)							Rochas ferríferas bandadas (Formação Jucurutu)									
SiO_2	39,50	33,47	39,13	41,07	43,74	44,52	44,08	45,24	49,35	50,12	47,78	42,26	41,45	50,58	49,45	45,34	1,20
Al_2O_3	0,63	0,43	0,52	0,63	0,51	0,33	0,61	0,21	0,18	0,10	0,14	2,42	0,97	0,66	0,81	0,50	0,49
Fe_2O_3	56,93	64,40	59,03	57,29	53,22	53,98	54,29	53,60	48,11	46,27	51,38	52,18	56,17	48,79	46,95	50,55	96,72
MnO	0,06	0,11	0,05	0,08	0,14	0,16	0,13	0,05	0,04	0,16	0,05	0,02	0,12	0,07	0,25	0,07	0,79
MgO	1,09	1,26	1,05	0,25	0,99	0,32	2,30	0,12	0,09	1,05	0,04	<0,01	1,46	0,1	1,59	1,79	0,19
CaO	0,68	1,10	0,94	0,33	1,02	<0,01	1,73	0,08	0,03	0,77	0,03	0,29	1,72	0,14	1,58	1,50	0,21
Na_2O	0,10	0,01	0,07	0,02	0,10	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,20	0,06	<0,01	0,06	0,05	0,01
K_2O	0,26	0,02	0,05	0,03	0,04	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	1,62	0,06	0,06	0,13	0,01	<0,01
P_2O_5	0,13	0,14	0,26	0,26	0,18	<0,01	0,07	0,13	0,07	0,11	0,13	0,36	0,06	0,07	0,02	0,09	0,22
TiO_2	0,02	0,1	0,02	<0,01	0,08	0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,32	0,06	0,04	0,04	0,02	0,01
Cr_2O_3	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,010	<0,010	0,030	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,013
LOI	0,60	-1,10	-1,20	0,00	<0,01	<0,01	<0,01	0,50	2,10	1,30	0,40	<0,01	0,45	0,60	<0,01	0,35	0,10
TOTAL	99,97	99,94	99,91	99,96	100,02	99,03	102,62	99,98	99,96	99,92	99,95	99,02	102,58	101,13	100,67	100,26	99,97

O teor de 1,62% de K_2O não é comum em formações ferríferas, que normalmente não ultrapassam 1%. O afloramento da amostra AR-021 é de uma lente da rocha ferrífera, na base da Formação Jucurutu, próxima do limite com ortognaisses graníticos do embasamento (Complexo Caicó). Apresenta até 20% de microclínio e leve alteração para argilo-minerais (maior potássio e alumínio). Provavelmente essa rocha apresenta um maior percentual de clásticos oriundos de fontes continentais durante a deposição das formações ferríferas.

Para ambos os grupos de rochas ferríferas (granulares e bandadas) das áreas de estudo, a distribuição dos óxidos encontra-se no limiar entre os tipos Algoma e Rapitan, principalmente nas formações ferríferas granulares. No geral, a litoquímica de elementos maiores para ocorrências de rochas ferríferas na Faixa Seridó são semelhantes aos padrões dos tipos genéticos do Canadá. Porém os teores de SiO_2 são menores e o de Fe_2O_{3T} são um pouco maiores, mas a diferença ainda é pequena e desconsiderável. A soma desses dois óxidos são maiores que aqueles encontrados no Canadá. Os teores de TiO_2 e K_2O são muito próximos, com poucas exceções. Al_2O_3 , MgO, CaO, Na_2O , K_2O e P_2O_5 apresentam teores normalmente menores do que aqueles observados nas rochas do Canadá. Apenas os teores de MnO são mais variados, ou para mais ou para menos da média dos tipos Algoma, Lago Superior e Rapitan.

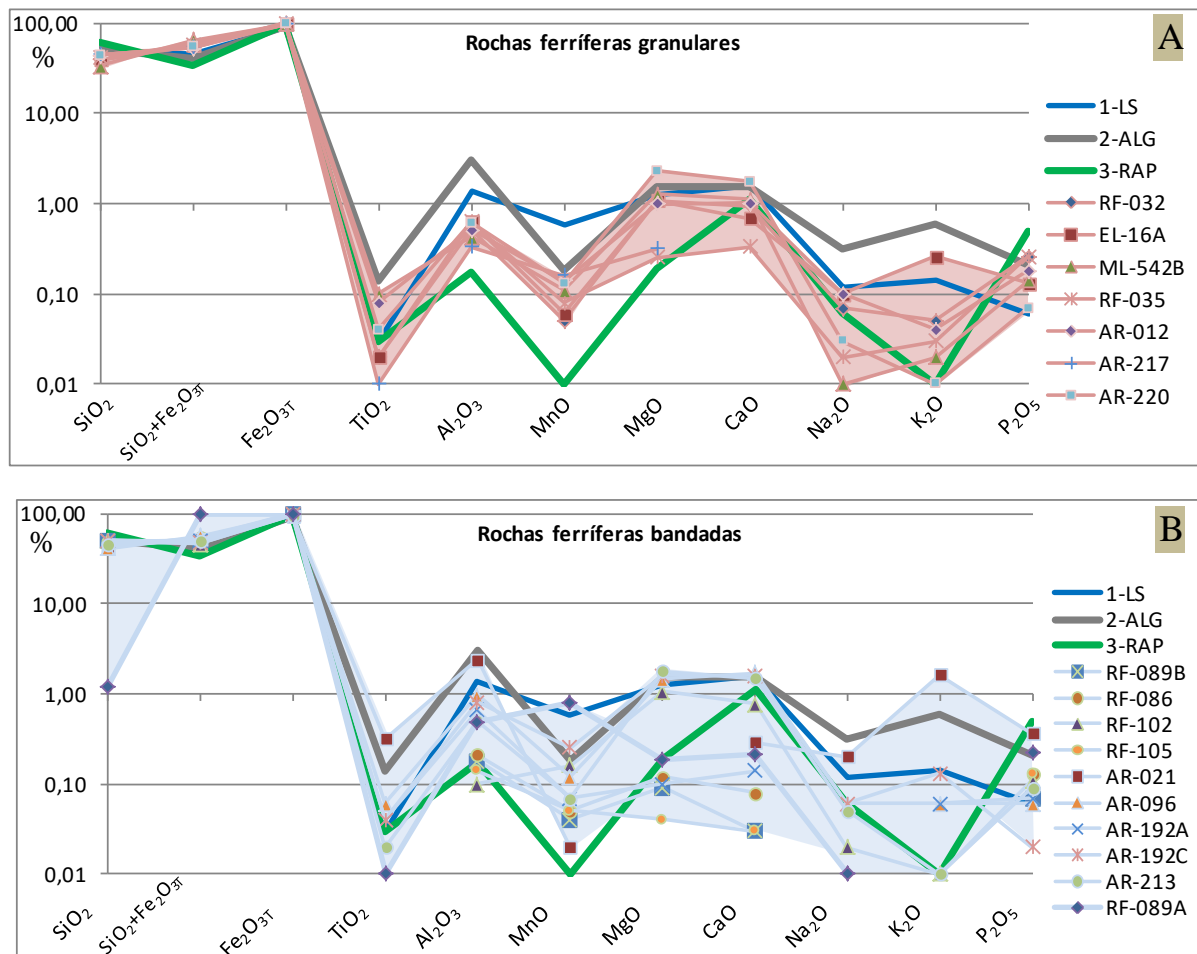


Figura 5.1 – Distribuição dos elementos químicos maiores das rochas ferríferas granulares (A) e bandadas (B) (linhas rosada e azul clara, respectivamente) localizadas nas áreas de estudo dos polígonos nordeste e sudoeste, em comparação com as médias dos tipos Algoma, Lago Superior e Rapitan do Canadá (linhas cinza, azul e verde, respectivamente). 1-LS: Fácies óxido - Tipo Lago Superior (Gross & McLeod 1980); 2-ALG: Fácies óxido - tipo Algoma (Gross & McLeod 1980); 3-RAP: Formações ferríferas bandadas do Canadá - Tipo Rapitan (Klein & Beukes 1993). Os polígonos em rosa e azul claro correspondem ao envelope com os resultados das análises químicas apresentadas neste trabalho.

Para a correlação entre óxidos apenas o SiO_2 e o Fe_2O_{3T} apresentam uma correlação representativa, que é negativa ou antitética ($R = -0,99$) (Figura 5.2), resultado corroborado pela caracterização petrográfica predominantemente bimodal nas rochas ferríferas da Faixa Seridó, representados por quartzo e minerais de ferro, principalmente óxidos e hidróxidos de ferro.

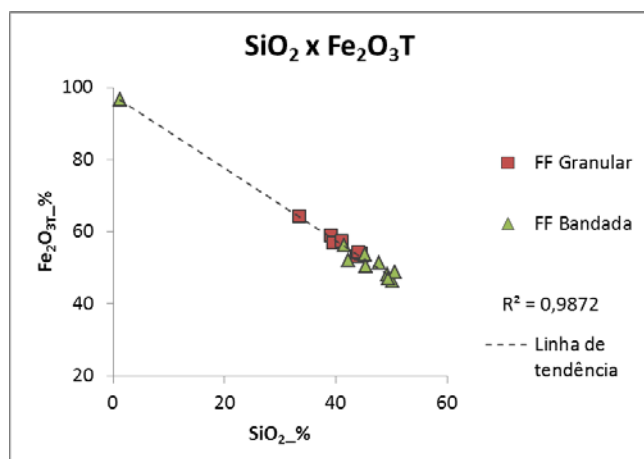


Figura 5.2 – Correlação SiO_2 versus Fe_2O_{3T} para o total de 17 amostras de ocorrências de formações ferríferas (FF's) granulares e bandadas na Faixa Seridó, encaixadas nas rochas do Complexo Caicó e Formação Jucurutu, na região central do Estado do Rio Grande do Norte. O valor de R^2 , correspondente ao coeficiente de correlação, é muito próximo de 1, indicando o ajustamento estatístico entre as amostras.

5.3 – Litoquímica dos Elementos Traços

As rochas ferríferas das áreas de estudo mostram valores baixos de elementos traços (Tabela 5.3). Os valores médios são de aproximadamente 25 ppm e os máximos não ultrapassam 100 ppm, com exceção do Rb, Sr e Ba que extrapolam esse valor em algumas amostras. Quinze elementos (V, Ag, Au, Bi, Cd, Hg, Sb, Tl, Sc, Se, Sn, Ta, Be, Cs e W) ficaram abaixo dos limites de determinação ou mostram valores mensuráveis em tão poucas amostras que não estão representados no gráfico multi-elementar. Seis elementos (Mo, Nb, Rb, Th, Ga e Hf) tiveram a maior parte das amostras mensuráveis, porém algumas ficaram abaixo do limite de detecção. Dez elementos (U, Y, Zr, Cu, Pb, Zn, Ni, Sr, Ba e Co) foram detectados em todas as amostras.

Tabela 5.3 - Análises químicas dos elementos traços das rochas ferríferas granulares e bandadas, além de uma amostra de minério de ferro maciço (RF-089A), encaixadas no Complexo Caicó e nas rochas da Formação Jucurutu, na região central do Rio Grande do Norte.

Amostra	EL-16A	ML-542B	RF-032	RF-035	AR-012	AR-217	AR-220	RF-086	RF-089B	RF-102	RF-105	AR-021	AR-096	AR-192A	AR-192C	AR-213	RF-089A
Valor em ppm	Rochas ferríferas granulares (Complexo Caicó)							Rochas ferríferas bandadas (Formação Jucurutu)									
U	0,30	0,20	0,20	0,10	0,62	0,27	0,42	0,20	0,40	0,40	0,10	5,36	0,25	0,15	0,14	0,18	0,90
V	26,00	14,00	8,00	<8,00	-	-	-	10,00	<8,00	<8,00	8,00	-	-	-	-	-	43,00
Y	10,30	5,10	7,70	15,10	9,11	5,09	7,69	3,40	2,80	3,10	1,60	4,88	10,02	3,71	6,74	3,76	10,60
Zr	5,70	5,10	4,90	2,80	14,90	3,50	7,20	3,30	2,00	0,80	0,90	37,20	12,10	13,90	15,00	3,20	7,60
Ag	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,01	<0,01	<0,01	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,10
As	<0,50	<0,50	1,4	2,1	<1,00	<1,00	<1,00	<0,50	<0,50	<0,50	0,60	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	2,30
Au	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Bi	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,02	<0,02	<0,02	<0,10	0,10	0,20	<0,10	0,03	0,08	<0,02	<0,02	0,07	0,30
Cd	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,01	<0,01	<0,01	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,01	0,01	0,02	0,04	0,04	<0,10
Cu	2,80	11,40	2,00	1,60	81,90	11,30	32,20	1,60	0,50	20,50	0,70	3,10	13,80	9,40	4,90	72,60	0,40
Hg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mo	0,10	0,40	<0,10	<0,10	1,13	1,10	0,91	0,10	0,80	5,40	<0,10	0,27	0,59	1,55	0,42	0,76	0,80
Pb	1,60	0,40	0,50	1,50	1,20	1,20	1,10	0,60	1,00	1,50	1,80	5,20	1,80	4,10	17,70	0,50	1,30
Sb	<0,10	<0,10	<0,10	0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,10	1,40	<0,10	0,30	0,14	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	2,10
Tl	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,50	0,80	<0,50	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	1,00	<0,50	<0,50	<0,50	1,30	<0,10
Zn	18,00	7,00	18,00	22,00	39,00	6,00	50,00	7,00	4,00	95,00	21,00	3,00	1,00	5,00	10,00	7,00	2,00
Nb	0,90	1,20	0,90	0,20	3,16	0,67	3,06	<0,10	<0,10	1,30	<0,10	9,22	0,80	1,33	0,72	1,05	1,00
Ni	3,60	7,10	4,10	2,60	6,30	10,20	3,70	6,60	7,40	7,40	4,40	17,50	20,30	8,30	10,10	9,90	8,20
Rb	6,40	1,30	2,20	2,10	0,40	0,50	0,30	0,50	<0,10	0,40	<0,10	145,40	3,10	4,50	8,60	0,30	<0,10
Sc	2,00	1,00	<1,00	<1,00	-	-	-	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	-	-	-	-	-	<1,00
Se	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<1,00	<1,00	<1,00	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<0,50
Sn	<1,00	2,00	<1,00	<1,00	1,80	0,80	1,70	4,00	<1,00	9,00	<1,00	37,30	1,10	0,50	<0,30	1,90	<1,00
Sr	28,00	5,90	20,70	17,80	23,70	<0,5	3,00	6,20	2,00	8,70	3,00	217,80	33,80	1,70	12,10	7,40	7,20
Ta	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,05	0,06	<0,05	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	1,24	<0,05	<0,05	<0,05	0,31	<0,10
Th	0,30	0,20	0,30	<0,20	3,00	1,10	0,80	<0,20	<0,20	<0,20	0,30	13,40	0,90	0,80	0,80	1,80	0,40
Ba	146,00	31,00	29,00	45,00	195,00	31,00	65,00	27,00	4,00	54,00	3,00	5430,00	57,00	42,00	39,00	122,00	87,00
Be	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	0,40	0,10	0,30	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	1,10	0,70	1,50	0,90	0,30	2,00
Co	1,50	5,80	1,90	0,40	12,70	2,20	11,50	0,80	1,40	2,30	0,40	5,40	3,60	1,70	2,30	5,10	12,30
Cs	<0,10	<0,10	0,10	<0,10	<0,05	<0,05	<0,05	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	1,10	0,31	0,18	0,40	0,07	<0,10
Ga	1,50	3,80	1,30	0,90	8,70	1,10	7,90	<0,50	<0,50	1,10	<0,50	13,30	2,00	1,00	1,10	3,10	1,00
Hf	0,10	<0,10	0,20	<0,10	0,38	0,23	0,23	<0,10	<0,10	0,10	<0,10	1,41	0,21	0,25	0,29	0,35	<0,10
W	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	2,10	1,50	1,60	<0,50	0,70	<0,50	<0,50	0,50	2,20	2,20	3,60	9,80	2,80

A investigação da afinidade dos elementos maiores com os elementos traços é realizada através do coeficiente de correlação (r), que é uma medida da intensidade da relação entre duas ou mais variáveis. A importância de realizar esse tratamento estatístico é para selecionar previamente as afinidades químicas, seja positiva ou negativa, entre determinados elementos químicos. Quanto mais próximo o coeficiente estiver de -1 ou $+1$, mais forte é a correlação entre essas variáveis. O cálculo é medido através da seguinte equação:

$$r = \frac{\text{covariância entre } x \text{ e } y}{(\text{desvio padrão } x) * (\text{desvio padrão } y)}$$

A tabela 5.4 (matriz de correlações) foi construída para mostrar o coeficiente de correlação entre os elementos maiores e os elementos traços para as rochas ferríferas das áreas de estudo. Os valores maiores que 0,9 representam alta correlação positiva

ou negativa e estão representados na tabela com a cor vermelha. Valores entre 0,7 e 0,9 estão em negrito. Correlações positivas ou negativas menores que 0,7 indicam maior dispersão dos dados e conseqüentemente menor correlação entre as variáveis.

Tabela 5.4 – Matriz de correlações entre os elementos maiores e os elementos traços para as rochas ferríferas granulares correlatas ao Complexo Caicó e formações ferríferas bandadas correlatas aos metassedimentos da Formação Jucurutu. Correlações entre 0,7 e 0,9, positivas ou negativas, estão em negrito. Em vermelho estão às correlações positivas ou negativas maiores que 0,9.

		Formação ferrífera granular (Complexo Caicó)															
		ppm															
		U	Y	Zr	Cu	Mo	Pb	Zn	Nb	Ni	Rb	Sr	Th	Ba	Co	Ga	Hf
%	Fe ₂ O ₃	-0,61	-0,18	-0,42	-0,51	-0,60	-0,65	-0,56	-0,43	-0,07	0,20	-0,31	-0,62	-0,47	-0,34	-0,35	-0,74
	SiO ₂	0,51	0,15	0,30	0,44	0,61	0,58	0,54	0,38	0,10	-0,33	0,17	0,55	0,29	0,31	0,31	0,70
	Al ₂ O ₃	0,00	0,77	0,07	-0,05	-0,50	0,46	0,57	0,13	-0,96	0,49	0,26	-0,24	0,33	0,02	0,12	-0,20
	MnO	0,52	-0,47	0,35	0,57	0,95	0,05	0,18	0,48	0,72	-0,74	-0,49	0,62	0,08	0,57	0,52	0,49
	MgO	0,41	-0,32	0,31	0,25	0,19	-0,28	0,64	0,71	-0,29	-0,11	-0,61	0,03	0,11	0,65	0,66	0,20
	CaO	0,51	-0,72	0,35	0,39	0,68	-0,40	0,58	0,78	0,32	-0,53	-0,67	0,27	-0,04	0,76	0,73	0,47
	Na ₂ O	0,56	0,06	0,58	0,39	0,15	0,35	0,16	0,23	0,01	0,44	0,83	0,55	0,80	0,10	0,11	0,63
	K ₂ O	-0,02	0,19	-0,10	-0,29	-0,37	0,51	-0,28	-0,30	-0,27	0,95	0,67	-0,17	0,45	-0,42	-0,40	-0,12
	P ₂ O ₅	-0,46	0,49	-0,25	-0,25	-0,56	-0,08	-0,41	-0,59	-0,23	0,03	0,47	-0,13	-0,24	-0,57	-0,58	-0,15
	TiO ₂	0,29	-0,17	0,50	0,50	0,17	-0,43	0,12	0,44	0,09	-0,34	-0,40	0,30	0,21	0,59	0,58	-0,14

		Formação ferrífera bandada (Formação Jucurutu)															
		ppm															
		U	Y	Zr	Cu	Mo	Pb	Zn	Nb	Ni	Rb	Sr	Th	Ba	Co	Ga	Hf
%	Fe ₂ O ₃	0,06	0,69	-0,02	-0,20	-0,17	-0,23	-0,27	-0,04	-0,01	-0,09	-0,06	-0,08	-0,06	0,88	-0,06	-0,18
	SiO ₂	-0,13	-0,71	-0,04	0,16	0,16	0,20	0,25	-0,03	-0,04	0,02	-0,01	0,00	-0,01	-0,92	-0,02	0,10
	Al ₂ O ₃	0,89	0,29	0,98	-0,09	-0,29	0,31	-0,35	0,92	0,77	0,92	0,93	0,93	0,91	0,27	0,93	0,95
	MnO	-0,09	0,71	-0,09	-0,18	0,04	0,07	-0,05	-0,15	-0,11	-0,22	-0,21	-0,22	-0,21	0,83	-0,20	-0,27
	MgO	-0,25	0,30	0,28	0,67	0,15	0,38	0,13	0,44	0,60	0,41	0,59	0,68	0,59	0,08	0,82	0,78
	CaO	-0,21	0,43	0,05	0,56	0,07	0,39	0,03	-0,09	0,53	-0,14	-0,07	-0,08	-0,16	0,06	0,02	0,08
	Na ₂ O	0,91	-0,25	0,94	-0,20	-0,41	0,18	-0,34	0,94	0,63	0,96	0,97	0,97	0,95	-0,16	0,96	0,99
	K ₂ O	0,99	-0,06	0,92	-0,37	-0,34	0,07	-0,26	0,99	0,49	1,00	0,99	0,99	1,00	0,60	0,98	0,99
	P ₂ O ₅	0,88	0,09	0,61	-0,21	-0,14	-0,21	-0,10	0,82	0,26	0,81	0,81	0,80	0,84	0,50	0,78	0,68
	TiO ₂	0,97	-0,27	0,96	-0,29	-0,51	0,04	-0,25	0,98	0,58	0,99	0,99	0,98	0,99	-0,07	0,97	0,97

A matriz de correlação (Tabela 5.4) mostra claramente a relação entre os elementos maiores Al₂O₃, Na₂O, K₂O e TiO₂ com os elementos traço U, Zr, Nb, Rb, Sr, Th, Ba, e Hf principalmente para as formações ferríferas bandadas. Ou seja, os elementos traço podem estar intrinsicamente relacionados à cristalização de minerais como filossilicatos (biotita) e anfibólios (de Fe-Mg e cálcicos). Para as formações ferríferas granulares poucos elementos maiores tem correlação com poucos elementos traços. Essas relações estão mais claras nas formações ferríferas bandadas, provavelmente por apresentar uma variedade maior de amostras com quantidades mais expressivas de anfibólios.

Alguns gráficos bivariantes significativos, conforme a matriz de correlação, dos elementos traços (Ni, Rb e Sr) versus elementos maiores (Al_2O_3 , Na_2O , K_2O) podem ser observados na Figura 5.3. Apenas na correlação Al_2O_3 versus Ni é possível observar claramente os dois agrupamentos de rochas distintos para formações ferríferas bandadas e granulares, que apresentam correlação positiva ($r = 0,77$) e negativa ($r = -0,96$) respectivamente. Para as correlações K_2O versus Rb e Na_2O versus Sr as correlações são positivas.

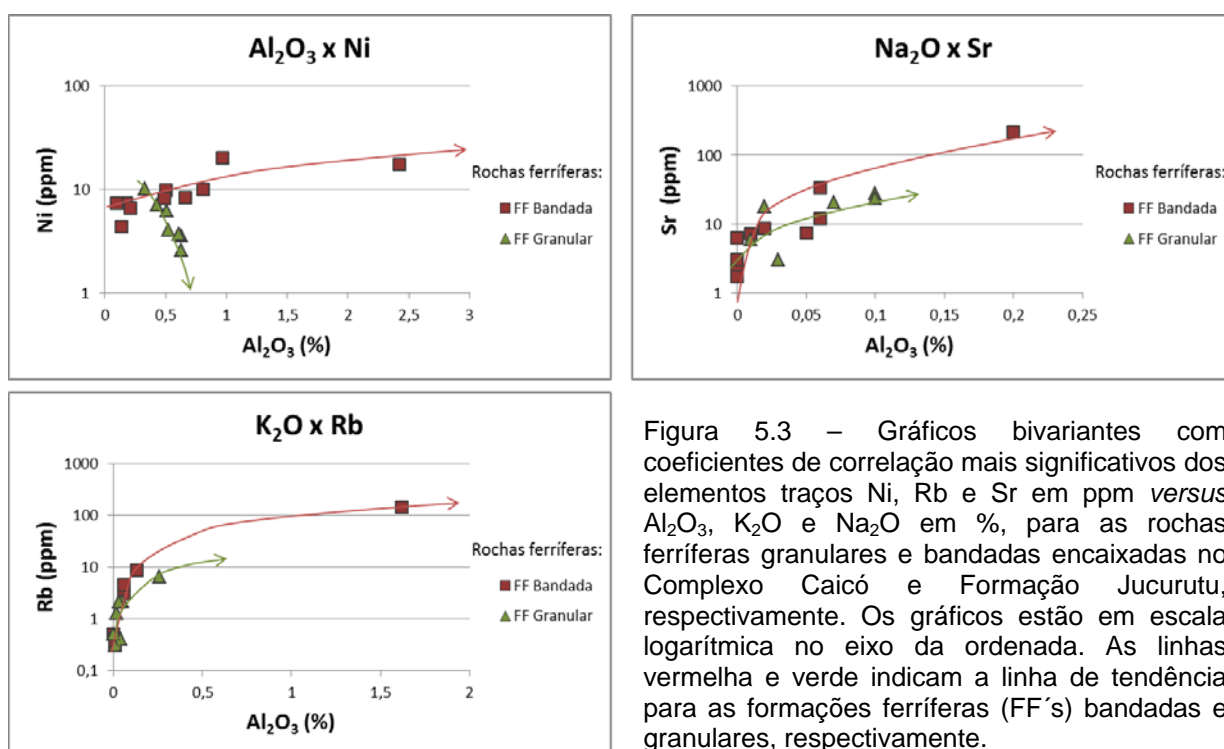


Figura 5.3 – Gráficos bivariantes com coeficientes de correlação mais significativos dos elementos traços Ni, Rb e Sr em ppm versus Al_2O_3 , K_2O e Na_2O em %, para as rochas ferríferas granulares e bandadas encaixadas no Complexo Caicó e Formação Jucurutu, respectivamente. Os gráficos estão em escala logarítmica no eixo da ordenada. As linhas vermelha e verde indicam a linha de tendência para as formações ferríferas (FF's) bandadas e granulares, respectivamente.

Apenas com o gráfico bivariante de Al_2O_3 x Ni (Figura 5.3) foi possível distinguir agrupamentos distintos de rochas ferríferas granulares e bandadas. Porém, outra maneira de analisar as concentrações de elementos traços nas amostras de rochas ferríferas nas áreas de estudo é apresentando os teores em ppm normalizados ao *Post-Archean Australian Shale* (PAAS) (Figura 5.4), obtidos por McLennan (1989). Esse estudo é focado sobre a fonte do ferro e a análise da correlação dos elementos traços com o reflexo da contribuição de fluidos hidrotermais e detríticos e sua relação com a mistura de sedimentos na água do mar (Gross 1983, Bekker et al. 2010).

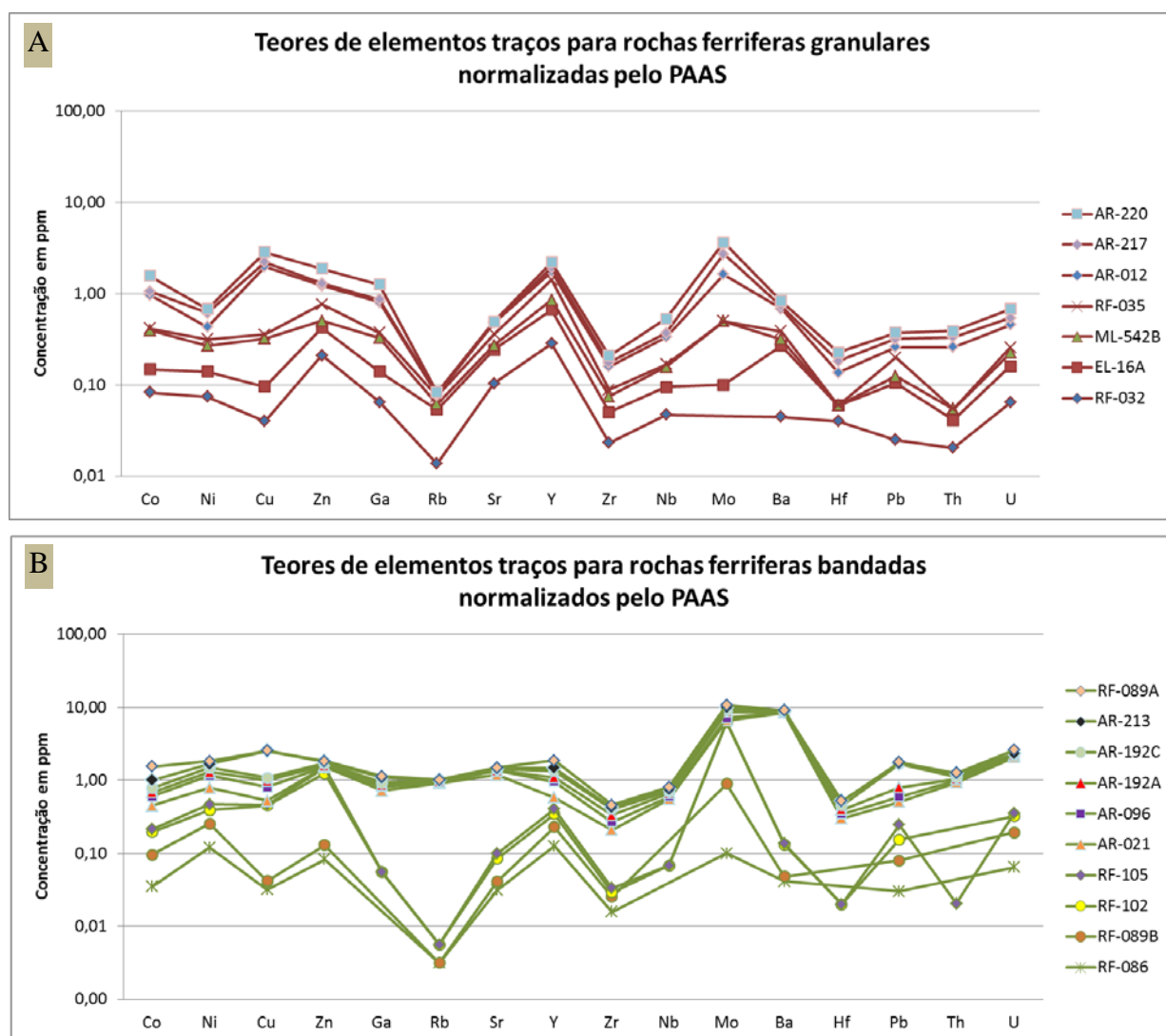


Figura 5.4 – Gráfico multielementar da distribuição de teores de elementos traços normalizados ao PAAS para as formações ferríferas granulares (A) e bandadas (B) das áreas de estudo. Escala vertical mostra valores de concentração (ppm) em escala logarítmica. As maiores concentrações de elementos traços litófilos (Rb, Sr, Y, Zr) estão relacionadas ao grupo de formações ferríferas (FF's) depositadas em sítios distais, enquanto que os elementos Co, Ni e Cu têm suas maiores concentrações relacionadas ao grupo de FF depositadas em sítios proximais as fontes hidrotermais (Gross 1983, Bekker et al. 2010).

Nos gráficos multielementares (Figura 5.4) percebem-se algumas particularidades para os dois grupos de rochas e as concentrações de elementos traços, ou seja, as rochas ferríferas granulares podem ser separadas das rochas ferríferas bandadas. O gráfico (Figura 5.4A) para as rochas ferríferas granulares é mais consistente. São claras as anomalias positivas de Zn, Y, Mo e Pb e negativas bastante pronunciadas de Rb e Zr, todas em relação ao PAAS. Para as rochas ferríferas bandadas (Figura 5.4B) existem dois conjuntos de amostras distintas. As amostras RF-086, RF-089B, RF-102 e RF-105 apresentam as mesmas anomalias positivas e

negativas das rochas ferríferas granulares, enquanto que as restantes apenas positivas de Mo e Pb, evidenciando também um agrupamento característico que indica homogeneidade desse segundo conjunto de amostras. Porém para ambos os conjuntos de formações ferríferas bandadas, as curvas apresentam uma anomalia positiva discreta de Ni em relação ao PAAS, diferentemente das formações ferríferas granulares. Para as rochas ferríferas granulares e bandadas o Mo apresenta ampla dispersão de dados.

5.4 – Litoquímica dos Elementos Terras-Raras (ETR)

Os teores dos elementos terras raras nas rochas ferríferas das áreas de estudo (polígonos nordeste e sudoeste) (Tabela 5.5) são baixos (teor máximo de 57 ppm e médio de 3 ppm), corroborando com aqueles observados nas BIFs fácies óxido no mundo (Appel 1987, Davy 1983). Appel (1987) diz que a distribuição dos ETR parece estar relacionada com o tipo de fácies, sendo o óxido o que apresenta os valores mais baixos.

Tabela 5.5 – Análises químicas dos elementos terras raras e ítrio (Y) das rochas ferríferas granulares e bandadas, encaixadas respectivamente no Complexo Caicó e nas rochas da Formação Jucurutu, na região central do Rio Grande do Norte.

Amostra	EL-16A	ML-542B	RF-032	RF-035	AR-012	AR-217	AR-220	RF-086	RF-089B	RF-102	RF-105	AR-021	AR-096	AR-192A	AR-192C	AR-213	RF-089A
Valor em ppm	Rochas ferríferas granulares (Complexo Caicó)								Rochas ferríferas bandadas (Formação Jucurutu)								
La	12,90	5,30	13,30	12,40	23,70	8,60	19,80	5,70	6,40	1,40	0,80	24,30	17,90	13,30	19,00	9,10	15,90
Ce	20,40	9,10	15,40	15,50	27,30	6,40	9,20	6,30	6,10	1,90	1,20	47,00	13,10	4,80	6,70	6,60	57,30
Pr	2,80	1,16	2,50	2,66	3,01	0,59	1,77	1,05	1,25	0,24	0,18	5,12	2,02	0,91	1,52	0,83	1,59
Nd	11,00	4,80	9,10	8,90	11,60	2,40	7,10	3,80	4,60	1,00	0,70	17,20	7,20	3,50	5,70	3,20	5,00
Sm	1,64	0,81	1,40	1,78	1,80	0,30	1,20	0,59	0,61	0,19	0,15	2,50	1,30	0,60	1,00	0,60	0,95
Eu	0,42	0,19	0,36	0,53	0,32	0,08	0,22	0,18	0,18	0,08	0,08	0,42	0,37	0,11	0,26	0,19	0,33
Gd	1,56	0,81	1,27	1,94	1,69	0,46	1,17	0,49	0,46	0,23	0,19	2,34	1,33	0,44	0,99	0,63	1,06
Tb	0,22	0,13	0,20	0,31	0,17	<0,05	0,15	0,09	0,08	0,04	0,04	0,37	0,17	<0,05	0,10	0,11	0,21
Dy	1,40	0,71	1,01	1,85	1,24	0,46	1,01	0,46	0,40	0,23	0,18	1,16	1,44	0,43	0,86	0,58	0,89
Y	10,30	5,10	7,70	15,10	9,11	5,09	7,69	3,40	2,80	3,10	1,60	4,88	10,02	3,71	6,74	3,76	10,60
Ho	0,26	0,14	0,23	0,41	0,21	0,09	0,21	0,09	0,07	0,06	0,05	0,28	0,23	<0,05	0,11	0,15	0,24
Er	0,82	0,49	0,63	1,23	0,68	0,36	0,61	0,27	0,24	0,18	0,09	0,58	0,90	0,21	0,49	0,33	0,78
Tm	0,14	0,07	0,11	0,19	<0,05	<0,05	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,17	0,08	<0,05	<0,05	0,07	0,11
Yb	0,70	0,44	0,57	1,08	0,60	0,30	0,60	0,22	0,21	0,20	0,15	0,50	0,70	0,20	0,30	0,30	0,72
Lu	0,12	0,07	0,10	0,16	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,16	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	0,12
Σ ETR	54,38	24,22	46,18	48,94	72,32	20,04	43,10	19,34	20,68	5,82	3,87	102,10	46,74	24,50	37,03	22,75	85,20
Σ ETRY	64,68	29,32	53,88	64,04	81,43	25,13	50,79	22,74	23,48	8,92	5,47	106,98	56,76	28,21	43,77	26,51	95,80
Ce/Ce*(PAAS)	0,78	0,85	0,61	0,62	0,71	0,55	0,32	0,59	0,50	0,75	0,73	0,97	0,47	0,27	0,25	0,50	2,41
Eu/Eu*(PAAS)	1,24	1,10	1,27	1,34	0,86	1,01	0,87	1,58	1,60	1,80	2,23	0,82	1,33	1,01	1,23	1,46	1,55
Pr/Pr*(PAAS)	1,09	1,03	1,23	1,32	1,00	0,88	1,23	1,24	1,33	1,02	1,14	1,06	1,21	1,26	1,36	1,06	0,42
Pr/Yb (PAAS)	1,28	0,84	1,40	0,79	1,60	0,63	0,94	1,52	1,90	0,38	0,38	3,27	0,92	1,45	1,62	0,88	0,71
Y/Ho	39,62	36,43	33,48	36,83	43,38	56,56	36,62	37,78	40,00	51,67	32,00	17,43	43,57	74,20	61,27	25,07	44,17
Sm/Yb(PAAS)	1,19	0,94	1,25	0,84	1,52	0,51	1,02	1,36	1,48	0,48	0,51	2,54	0,94	1,52	1,69	1,02	0,67
Eu/Sm(PAAS)	1,32	1,21	1,32	1,53	0,91	1,37	0,94	1,57	1,52	2,16	2,74	0,86	1,46	0,94	1,34	1,63	1,79

Neste trabalho a análise do comportamento dos ETR nas rochas ferríferas foi realizada normalizando os resultados pelo *Pos-Archean Australian Shale* (PAAS). A anomalia de Eu^* foi definida quantitativamente segundo a média geométrica recomendada por McLennan (1989), como: $\frac{Eu}{Eu^*} = \frac{Eu_N}{[(Sm_N)*(Gd_N)]^{1/2}}$, onde Eu^* é uma concentração hipotética de Eu.

A anomalia verdadeira de Ce^* , além da anomalia de Pr^* foi definida conforme as equações observadas em Planavsky et al. (2010):

$$\frac{Ce}{Ce^*} = \frac{Ce_N}{(0,5Pr_N+0,5La_N)} \quad \frac{Pr}{Pr^*} = \frac{Pr_N}{(0,5Ce_N+0,5Nd_N)}$$

onde Ce_N , Pr_N , La_N e Nd_N representam os valores desses terras raras normalizados pelo PAAS.

O grau de enriquecimento de ETRL em relação ao ETRP é apresentado na razão normalizada ao PAAS de Sm e Yb: $(Sm/Yb)_N$. Os valores para as rochas ferríferas granulares variam de 0,51 até 1,52, enquanto para as rochas ferríferas bandadas de 0,48 até 1,69, com exceção da amostra AR-021 com valor de 2,54. São dados (Tabela 5.5) similares aos dois grupos de rocha, que indicam tendências lineares (próximos de 1), exceto a amostra AR-021 que apresenta enriquecimento mais pronunciado de ETRL sobre ETRP.

As rochas ferríferas das áreas de estudo apresentam razão variada de Y/Ho entre 17 e 74. A razão Y/Ho típica da água do mar fica entre 60 e 90, enquanto os valores para águas continentais se situam mais próximos dos valores crustais (26-27) (Planavsky et al. 2010). Levando isso em consideração quase todas as amostras apresentam alguma influencia de águas continentais. Apenas as amostras RF-102, AR-217, AR-192A e AR-192C (ambas do mesmo afloramento) apresentam mais influência de águas marinhas. A amostra AR-217 é de rocha ferrífera granular, enquanto as outras três são de rochas ferríferas bandadas.

Ce/Ce*

Anomalia de Ce na água do mar é sensível à variação das condições redox e tem sido utilizada para averiguar condições subóxica ou anóxica da coluna de água. Há duas interpretações das causas de variação de anomalia de Ce na água do mar. Segundo Wright et al. (1987) e Liu et al. (1988) a anomalia de Ce é um traçador químico para condições redox paleoceânicas. Os valores de $Ce < -0,1$ resultam do

empobrecimento de Cério ou fracionamento para óxidos metálicos, indicando condições oxidantes. Valores de $Ce > -0,1$ ao contrário, refletiriam condições anóxicas na água do mar. Para calcular a anomalia de Ce_N conforme discutido acima, utilizou-se o normalizador *North American Shale Composite Standard* (NASC) de Haskin et al. (1968), de acordo com a fórmula seguinte:

$$\frac{Ce}{Ce^*} = \text{Log} \left[\frac{3Ce_N}{(2La_N + Nd_N)} \right].$$

Os valores resultantes de Ce/Ce^* normalizados pelo NASC seguem na Tabela 5.6. Posteriormente será apresentado o gráfico $Ce/Ce^* \times Nd$ para uma melhor representação dos dados (Figura 5.5).

Tabela 5.6 – Resultados do cálculo do parâmetro Ce/Ce^* normalizado pelo NASC (*North American Shale Composite*) para as amostras de rochas ferríferas granulares e bandadas das áreas de estudo, na região central do Rio Grande do Norte.

Formação ferrífera granular (Complexo Caicó)							
Amostra	RF-032	EL-16A	ML-542B	RF-035	AR-012	AR-217	AR-220
Ce/Ce*	-0,234	-0,128	-0,101	-0,207	-0,200	-0,347	-0,569

Formação ferrífera bandada (Formação Jucurutu)										
Amostra	RF-086	RF-089B	RF-102	RF-105	RF-089A	AR-021	AR-096	AR-192A	AR-192C	AR-213
Ce/Ce*	-0,251	-0,325	-0,170	-0,154	0,330	-0,015	-0,380	-0,658	-0,676	-0,374

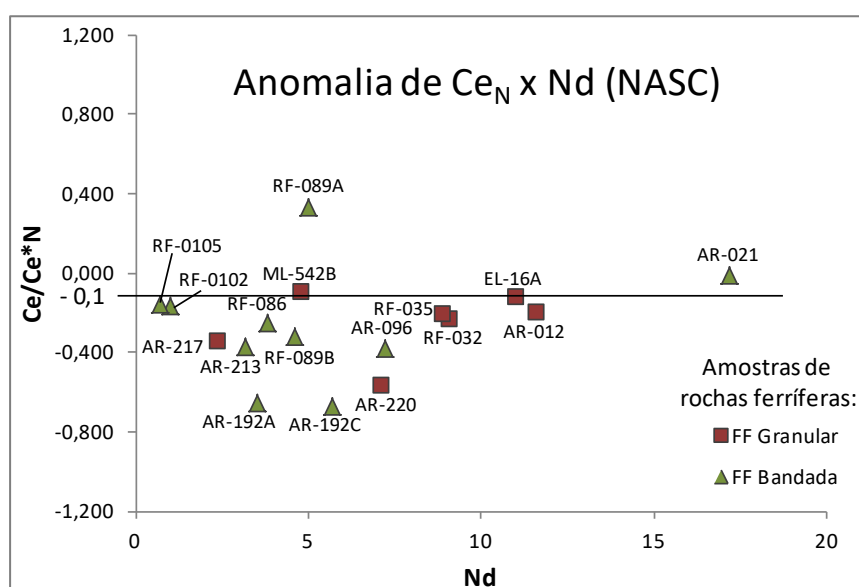


Figura 5.5 – Anomalia de Ce/Ce^* normalizado pelo NASC versus Nd das ocorrências de formações ferríferas (FF's) granulares e bandadas das áreas de estudo, na região central do Rio Grande do Norte.

Os valores de Ce/Ce^* quando plotados contra Nd claramente situam-se abaixo de $-0,1$ indicando um ambiente oxidante, exceto para as amostras AR-021 e RF-089A, ambas de formação ferrífera bandada depositadas em condições anóxicas.

A abundância na concentração de La pode mascarar as anomalias de Ce. Para testar se as anomalias de Ce/Ce^* são reais, utilizou-se o diagrama discriminatório de

Bau & Dulsky (1996), plotando Ce/Ce^* versus Pr/Pr^* (Figura 5.7). Para as rochas ferríferas das áreas de estudo, de acordo com o diagrama da Figura 5.6, a maioria das rochas ferríferas apresenta anomalia negativa de Ce, indicando ambiente oxidante durante a deposição das rochas. Segundo Bau & Dulsky (1996) a combinação de $(Ce/Ce^*)_{SN} < 1$ e $(Pr/Pr^*)_{SN} \sim 1$ indicam anomalias positivas de La, conforme é possível observar às amostras que se encontram nos campos IIa e IV do gráfico $Ce_N \times Pr_N$ (Figura 5.6). Apenas duas amostras encontram-se fora desses campos apresentados no gráfico da figura 5.6: AR-021 e RF-089A. A amostra AR-021 encontra-se próxima ao campo I, enquanto a amostra RF-089A extrapola os limites do gráfico.

Conforme indicado na figura 5.7 a maioria das amostras marcam verdadeiras anomalias negativas em cério, sendo que algumas amostras registram tendências para anomalias positivas em La, mascarando as anomalias negativas de Ce. Isto implica que os grupos de rochas estudados definem representantes extremos de condições da bacia, onde zonas de superposição evidenciam ambientes intermediários e/ou transicionais entre os sítios deposicionais.

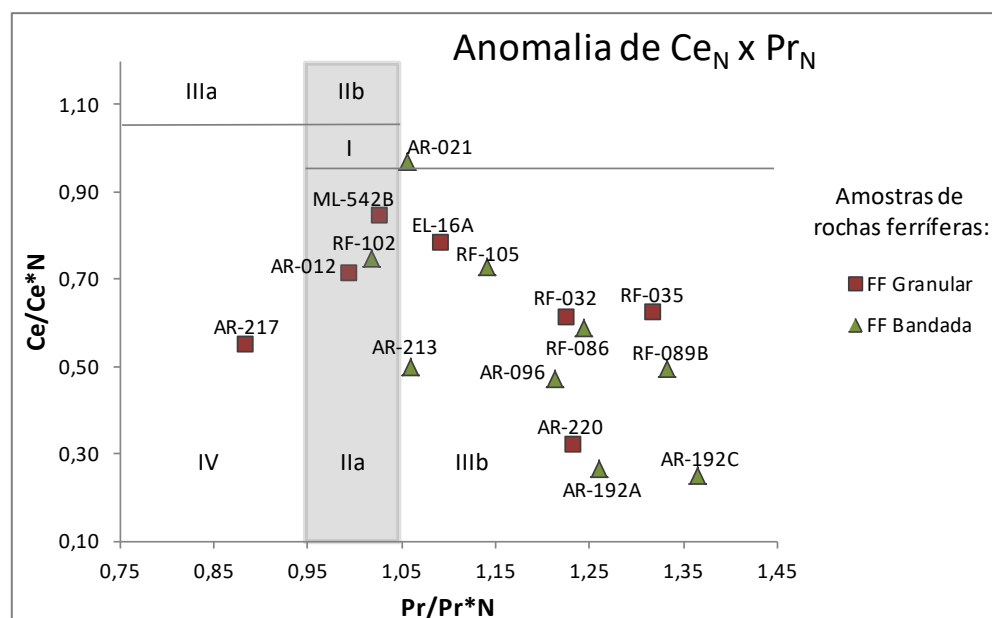


Figura 5.6 – Gráfico da anomalia de Ce/Ce^* versus Pr/Pr^* normalizados pelo PAAS (Bau & Dulski 1996) para as formações ferríferas (FF's) granulares e bandadas das áreas de estudo. I - sem anomalia; IIa - anomalia positiva de La causa aparente anomalia negativa de Ce; IIb - anomalia negativa de La causa aparente anomalia positiva de Ce; IIIa - real anomalia positiva de Ce; IIIb - real anomalia negativa de Ce; IV - anomalia positiva de La disfarçada de anomalia positiva de Ce.

Eu/Eu*

Segundo Klein (2005) diferenças na amplitude de anomalias de Eu resultam de um declínio da contribuição hidrotermal nas bacias oceânicas do Arqueano ao Neoproterozoico, Bau & Möller (1993) atribuem essa redução à queda de temperatura das soluções hidrotermais.

Nas áreas de estudo quase todas as amostras normalizadas em relação ao PAAS mostram anomalias positivas de európio ($Eu/Eu^* > 1$, Tabela 5.4), típicas de soluções hidrotermais oceânicas originadas em sistemas convectivos submarinos. Em alguns locais a incipiente ou ausente anomalia de Eu pode ser decorrente das condições de baixa temperatura do fluido mineralizador, neste caso fluidos de alta temperatura são escassos ou ausentes. Apenas as amostras AR-012 e AR-220 de formação ferrífera granular e AR-021 de formação ferrífera bandada apresentam valores menores que 1, porém bem próximas, representando assim uma suave anomalia negativa de Eu.

Interpretação dos gráficos de concentração de ETR's

Na figura 5.7 observam-se os gráficos de padrão ETR normalizado ao PAAS (*Post-Arquean Australian Shale*) em escala logarítmica, para as amostras de rochas ferríferas granulares (Figura 5.7A) e bandadas (Figura 5.7B), localizadas nas áreas de estudo nordeste e sudoeste na Faixa Seridó.

As amostras de rochas ferríferas granulares (Figura 5.7A) apresentam anomalia negativa de cério ($Ce/Ce^* = 0,32-0,85$) e anomalias positiva e negativa de európio ($Eu/Eu^* = 0,86-1,34$) muito pouco pronunciada. O comportamento dos ETR é aproximadamente planar, com leve fracionamento dos ETRP, mais pronunciado nas amostras AR-217, RF-035 e ML-542B.

As amostras de rochas ferríferas bandadas (Figura 5.7B) apresentam anomalia negativa de cério (0,25-0,75) pronunciada, exceto para as amostras AR-021 ($Ce/Ce^* = 0,97$, anomalia negativa pouco pronunciada) e RF-089A ($Ce/Ce^* = 2,41$, anomalia positiva). O európio apresenta-se com anomalias positivas ($Eu/Eu^* = 1,01-2,23$), exceto para amostra AR-021 ($Eu/Eu^* = 0,82$, anomalia negativa pouco pronunciada). O comportamento dos ETR é aproximadamente planar, com leve fracionamento dos ETRP, mais pronunciado nas amostras RF-102 e RF-105. Os ETRL apresentam

fracionamento em relação aos ETRP na amostra AR-021, contrariando o comportamento geral das amostras do grupo.

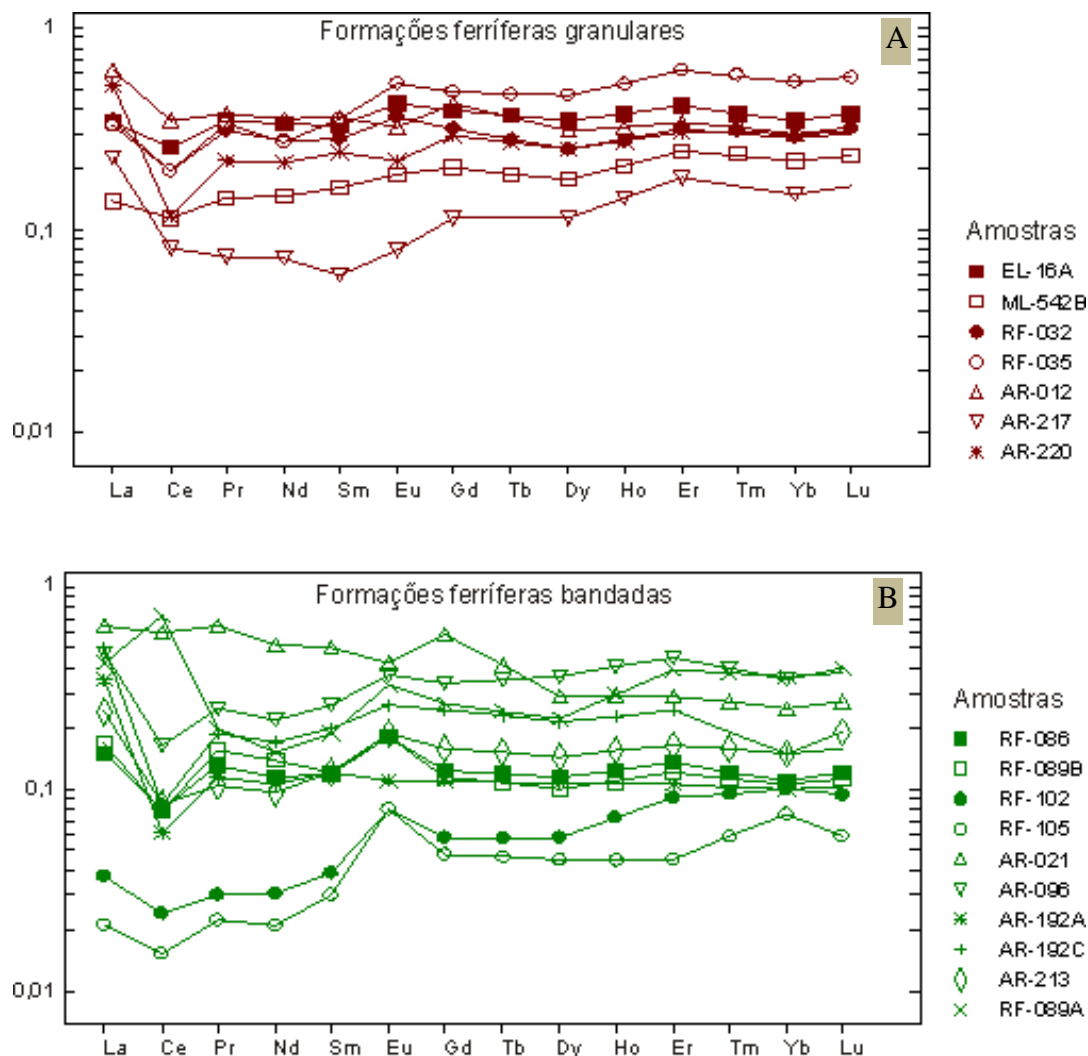


Figura 5.7 – Padrão ETR normalizado ao PAAS (*Post-Arquean Australian Shale*) para as amostras de rochas ferríferas granulares (A) e bandadas (B) nas áreas de estudo dos polígonos nordeste e sudoeste na Faixa Seridó.

Análise conjunta dos dados de ETR

O padrão de todo o conjunto de dados das rochas ferríferas granulares é mais regular que as rochas ferríferas bandadas. As concentrações de ETR são mais parecidas. As amostras apresentam anomalia negativa de Ce e positiva e negativa de Eu, porém pouco pronunciadas (próximo de 1). O leve fracionamento dos ETRP é mais regular no conjunto de amostras de formações ferríferas granulares que no grupo de rochas ferríferas bandadas.

Para as rochas ferríferas bandadas é notório que a concentração dos ETR é mais variada. Algumas amostras apresentam fracionamento dos ETRP mais pronunciado (RF-102 e RF-105) e apenas uma apresenta fracionamento dos ETRL (AR-021), enquanto a maioria das amostras tem um leve fracionamento dos ETRP. As anomalias negativas de Ce são normalmente pronunciadas, exceto para uma única amostra com anomalia positiva (RF-089A). As anomalias positivas de Eu são mais pronunciadas que nas amostras de formações ferríferas granulares. É importante reconhecer que petrograficamente as amostras de formações ferríferas bandadas apresentam uma maior variação no percentual de anfibólios do que as amostras de formação ferrífera granular, provocando contudo, uma maior variação na química da rocha, pela presença minerais silicatos.

5.5 – Natureza e Ambiente Tectônico das Formações Ferríferas

Alguns autores como Johannesson et al. (2006) e Ilouga et al. (2013) discutem alterações na distribuição elementar de formações ferríferas aliados a processos metamórficos e/ou intempéricos, algo comum que ocorreu por exemplo na região da Faixa Seridó. É possível realizar análises gráficas com o uso dos elementos traços Zr *versus* Th, Ti *versus* Zr e Ti *versus* Th para observar o grau de pureza de formações ferríferas (Figura 5.8). Viehmann et al. (2016) estudaram a pureza química das formações ferríferas de Urucum conseguindo discriminar as BIFs puras daquelas que são impuras e influenciadas por aporte de material sedimentar. Abrahão Filho (2016) estudou amostras das formações ferríferas bandadas de Senador Elói de Sousa, no Rio Grande do Norte, que se posicionaram em grande parte em campos de formações ferríferas puras ou transicionais a sedimentos químico-exalativos dotados de alguma contribuição sedimentar.

As formações ferríferas bandadas e granulares das áreas de estudo, na Faixa Seridó, posicionam-se principalmente no campo de “FFB Pura”. Apenas algumas se posicionaram fora desse campo, porém bem próximas, refletindo baixos níveis de impureza. Somente a amostra AR-021 nos gráficos de Th *versus* Zr e Th *versus* Ti aproximou-se do campo “Detritos” evidenciando a influência da presença de material siliciclástico como corroborado pela petrografia (maior quantidade de microclínio). Portanto, através dessas relações, as formações ferríferas granulares e bandadas das

áreas de estudo são pouco influenciadas por sedimentação terrígena (Figura 5.9), sendo possível caracterizá-las como formações ferríferas puras com baixa incidência de aporte siliciclástico.

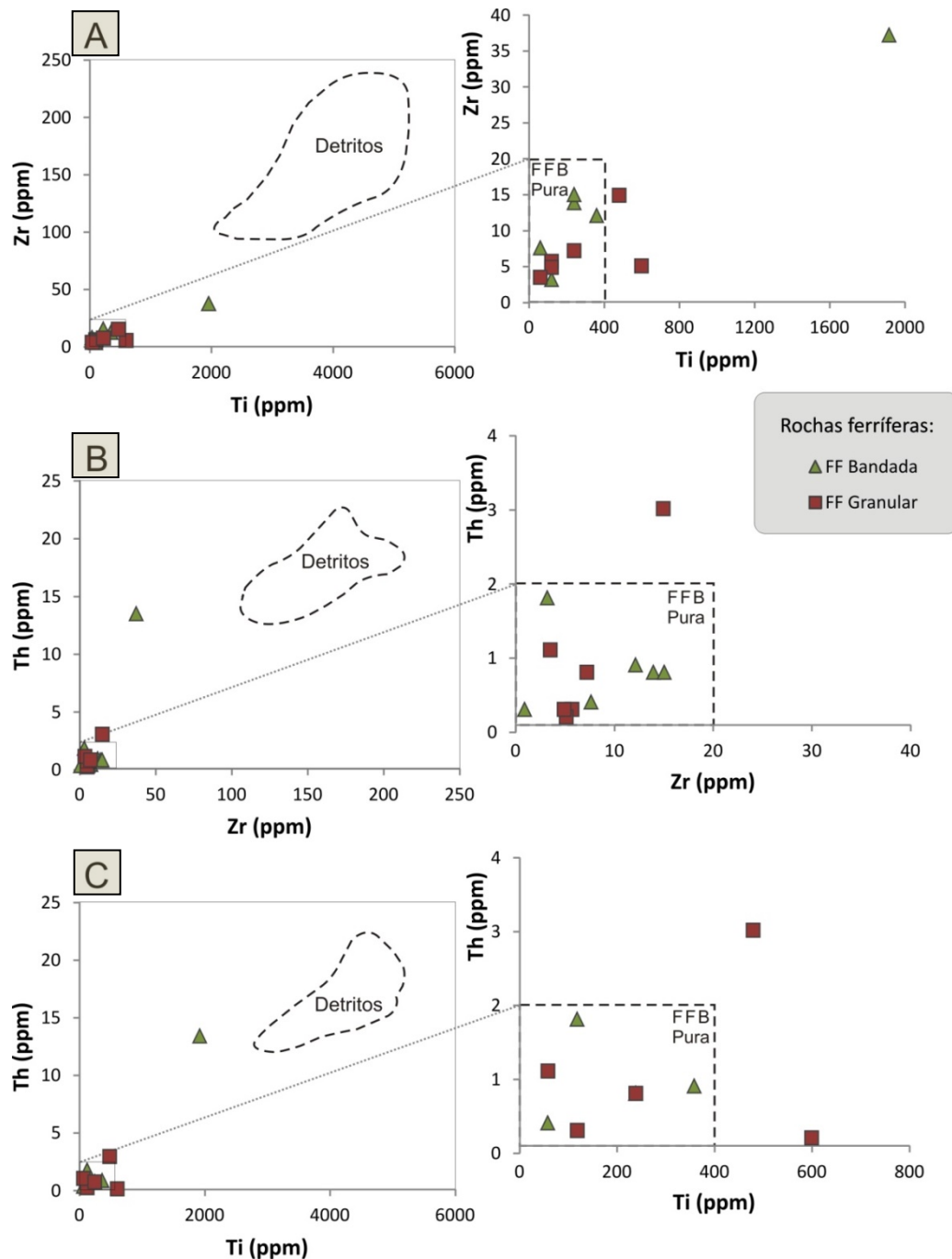


Figura 5.8 – Diagramas binários utilizando elementos traços para análise de pureza de formações ferríferas segundo Viehmann et al. (2016). (A) Ti versus Zr; (B) Zr versus Th e (C) Ti versus Th. Nesses gráficos, o campo "detritos" indica onde estão plotadas as amostras de sedimentos siliciclásticos finos. O campo "FFB Pura" reflete onde estão plotadas as amostras de formações ferríferas (FF's) puras. As FF's da Faixa Seridó estão posicionadas principalmente internas ou nas imediações dos campos "FFB Pura", refletindo seus elevados graus de pureza, com baixa contribuição sedimentar.

Para conhecimento do processo genético que sugere que sedimentos químicos ricos em metais hidrotermais podem ser distinguidos de depósitos hidrógenos formados por processos diagenéticos ou não hidrotermais é possível analisar graficamente os elementos Al, Si, Fe e Mn baseados em suas abundâncias relativas (Bonatti 1975, Adachi et al. 1986). Através do gráfico de Al_2O_3 versus SiO_2 (Figura 5.9A) observa-se que as formações ferríferas granulares e bandadas das áreas de trabalho resultam da ação de fluidos hidrotermais submarinos, corroborando com o diagrama ternário Al-Fe-Mn (Figura 5.9B) que apresenta o mesmo resultado, ou seja, as formações ferríferas estudadas configuram sedimentos químico-exalativos hidrotermais. A amostra RF-089A, de minério de ferro maciço, está no campo de depósitos hidrógenos no diagrama Al_2O_3 versus SiO_2 , porém no diagrama ternário Al-Fe-Mn é confirmada como resultante da ação de fluidos hidrotermais.

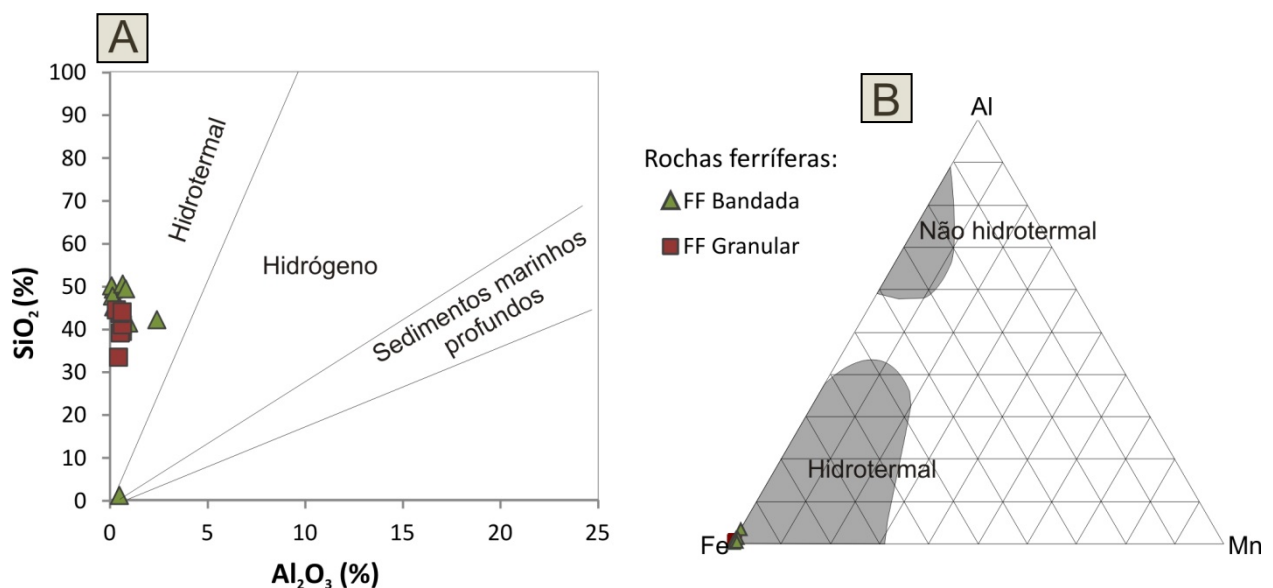


Figura 5.9 – (A) Diagrama binário Al_2O_3 versus SiO_2 de Bonatti (1975) e (B) Diagrama ternário Al-Fe-Mn de Adachi et al. (1986) mostrando o tipo de formação ferrífera em relação ao processo genético. Em ambos os casos as formações ferríferas granulares e bandadas estudadas na Faixa Seridó estão relacionadas a fluidos hidrotermais de água oceânica.

Os ambientes tectônicos podem ser definidos através de gráficos com as razões $\text{Al}_2\text{O}_3/(100-\text{SiO}_2)$ versus $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100-\text{SiO}_2)$ de Murray (1994) (Figura 5.10A) e SiO_2 versus $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ de Roser & Korsch (1986) (Figura 5.10B). As amostras de formações ferríferas granulares e bandadas nas áreas de estudo da Faixa Seridó estão plotadas em campos próximos a cadeias oceânicas (Figura 5.10A) localizadas nas imediações de margens continentais ativas transicionais a arcos de ilha (Figura 5.10B).

Apenas a amostra AR-021 encontra-se no campo de margem continental passiva (Figura 5.10B).

As amostras de formações ferríferas desse trabalho apresentam comportamento parecido com os mesmos ambientes tectônicos observados na região de rochas arqueanas do Domínio São José do Campestre (DSJC) estudada por Abrahão Filho (2016). Este autor afirma que a região do DSJC suportaria uma rápida e curta variação espacial e temporal de sítios deposicionais e ambientes tectônicos arqueanos, refletida em um diacronismo acentuado. Isso explicaria a influência mútua de aportes hidrotermais e sedimentares em diferentes proporções para os grupos de BIFs, bem como suas assinaturas híbridas entre ambientes de cadeia meso-oceânica e de arco magmático insular ou continental.

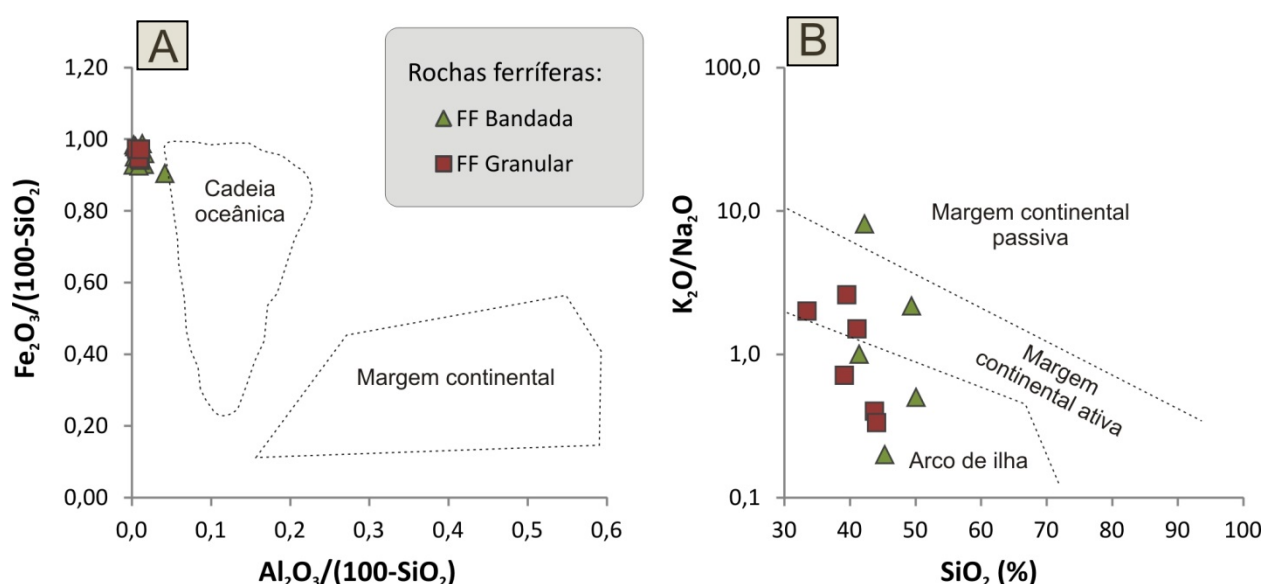


Figura 5.10 – (A) Diagrama $Al_2O_3/(100-SiO_2) \times Fe_2O_3/(100-SiO_2)$ (Murray 1994) com as amostras de formações ferríferas (FF) granulares e bandadas da Faixa Seridó próximas ao campo de cadeias oceânicas. (B) Diagrama $SiO_2 \times K_2O/Na_2O$ (Roser & Korsch 1986) com as amostras de formações ferríferas granulares e bandadas da Faixa Seridó principalmente entre os campos de margens continentais ativas e arcos de ilha.

Abrahão Filho (2016) propõe um modelo que indica uma dorsal meso-oceânica, ainda em atividade, próxima a uma zona de subducção de uma crosta oceânica sob outra no caso de um eventual ambiente tectônico de arco de ilha, ou de uma crosta oceânica sob uma crosta continental no caso de sítios deposicionais em margens continentais ativas. O ambiente deposicional marinho seria relativamente homogêneo, livre de mudanças bruscas em suas condições de oxi-redução, em um possível oceano

raso. Seus dados indicariam um oceano onde os depósitos de ferro químico-exalativos deveriam ser reclusos, em um estágio avançado de fechamento e por isso ter dimensões reduzidas (Figura 5.11).

Como as amostras estudadas nas áreas dos polígonos sudoeste e nordeste na Faixa Seridó apresentam as mesmas características observadas pelas amostras de Abraão Filho (2016), o modelo proposto pode ser aplicado, em especial para o entendimento da espacialização do ambiente tectônico, como pode ser observado na Figura 5.11 simplificada do modelo proposto por Abraão Filho (2016). Mesmo considerando que todas essas amostras ocorreram em períodos geológicos distintos, os processos e ambientes de formação são similares.

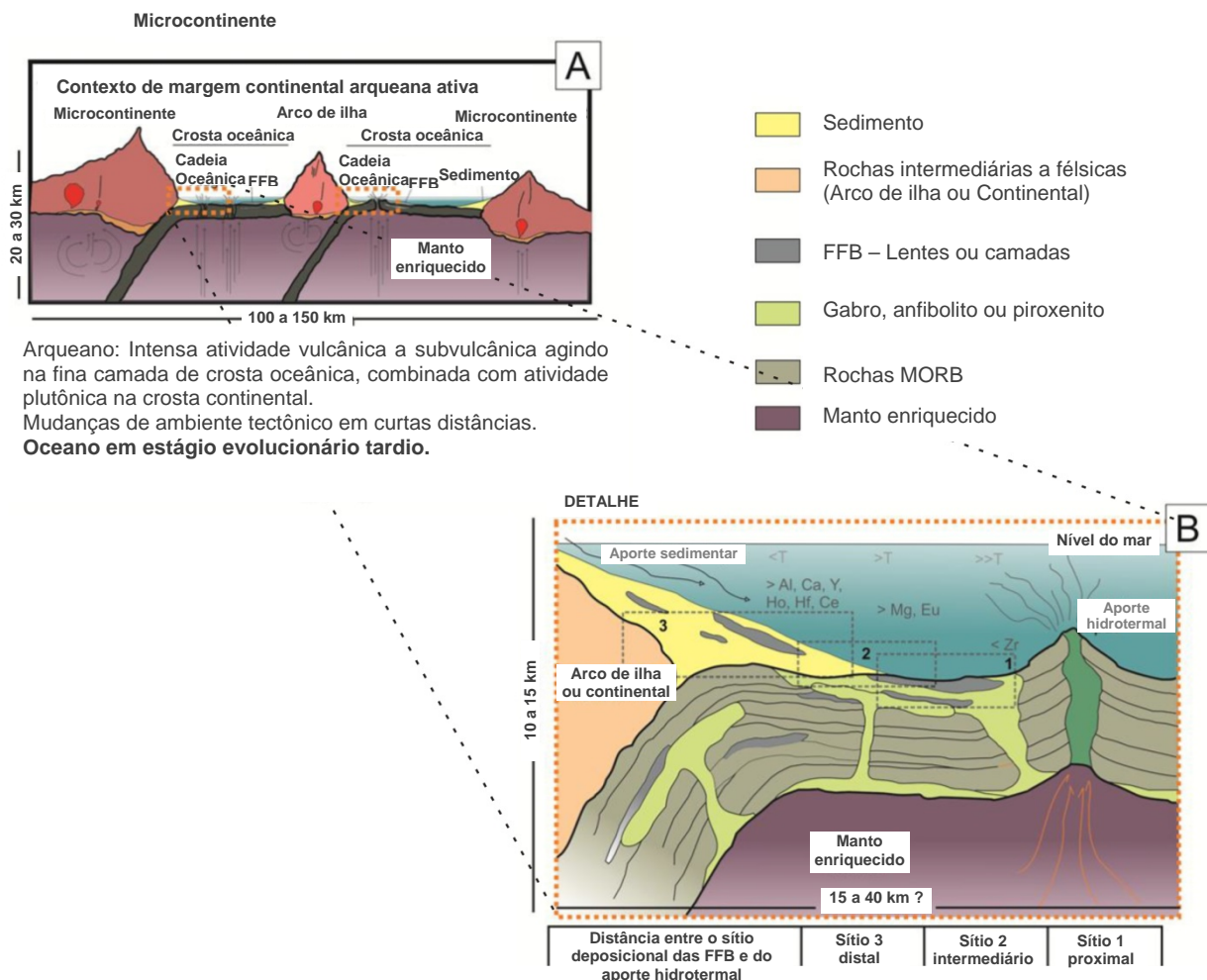


Figura 5.11 – (A) Modelo simplificado do proposto por Abraão Filho (2016) para o quadro geotectônico existente no período da gênese das rochas ferríferas no DSJC de um ambiente de oceano em estágio evolucionário avançado, com uma cadeia oceânica prestes a subductar. (B) trata-se do detalhe da área tracejada vermelha na figura A. As rochas ferríferas granulares e bandadas das áreas de estudo na Faixa Seridó apresentam comportamento similar nos gráficos de ambiência tectônica à apresentada pelas rochas ferríferas depositadas no DSJC.

Outro modelo já discutido na literatura para as a formação da bacia que depositou os sedimentos da Formação Jucurutu, onde estão depositados as formações ferríferas da região da mina de Saquinho, em Cruzeta/RN, é o de Sial et al. (2015). Estes autores previram dois cenários diferentes para deposição da Formação Jucurutu:

(a) A sedimentação em uma bacia madura tipo rift sem influência glacial durante a deposição de BIF e carbonatos, com características de BIF's do tipo Algoma, ou,

(b) Deposição em uma bacia rifte na sequência final da Glaciação Criogeniana. Se este for o caso, o gelo nunca teria chegado a bacia Jucurutu e a glaciação não teria sido de natureza global. O único efeito glacial registrado na bacia do Jucurutu seria da queda do nível do mar, como indicado por carbonatos estromatolíticos sobrepostos por BIF na mina de ferro do Bonito, em Jucurutu.

Em resumo, para Sial et al. (2015) um ambiente extensional explicaria a maioria das feições observadas nos BIFs do Seridó. O caráter excepcionalmente elevado de Cr e características de não fracionamento dos BIFs sugerem que eles foram provavelmente gerados por lixiviação de rochas máficas ou ultramáficas em sistemas hidrotermais (Figura 5.12). Cavalcante et al. (2015b) apresentaram um furo estratigráfico na região da mina de Saquinho e reconheceram a presença na base de uma sequência de rochas de composição quartzo-feldspática com bandas máficas ricas em biotita e anfibólio, de granulação fina e/ou média com intercalações de metaultramáficas (metanfíbolitos e metapiroxenitos), o mesmo agrupamento de rochas citado por Sial et al. (2015). Cavalcante et al. (2015b)) discutem se essas rochas seriam do Complexo Caicó ou outra sequência de rochas que ocorrem como um substrato para as formações ferríferas bandadas correlatas a Formação Jucurutu ou base dos *augens* gnaisses do Complexo Caicó.

Sial et al. (2015) sugere ainda que uma bacia extensional poderia ser o cenário mais provável, especialmente em uma bacia *rift*, embora a evidência seja escassa. Com base nas idades de zircão detríticos e natureza do embasamento e litoestratigrafia, Van Schmus et al. (2003) propuseram que a Formação Jucurutu fosse depositada como resultado da extensão no final do Neoproterozoico de um embasamento continental pré-existente, com formação de pequenas bacias marinhas. Um cenário de fenda, com bacias estreitas e forte entrada hidrotermal (Figura 5.12), se encaixa com os dados geoquímicos apresentados por Sial et al. (2015), especialmente

as anomalias positivas de Eu e Ce. Altas concentrações de Cr, presentes nas amostras de Sial et al. (2015), não foram observadas nas análises de litoquímica deste trabalho, apenas enriquecimento em Ni em relação ao PAAS, para as amostras de formação ferrífera bandada.

Na figura 5.12 sugere-se a distribuição espacial para as amostras de formações ferríferas granulares correlacionadas as rochas do Complexo Caicó e as formações ferríferas bandadas correlacionadas as rochas da Formação Jucurutu das áreas de estudo, com base no modelo deposicional proposto por Sial et al. (2015). É importante destacar que a deposição dessas rochas ocorreu em períodos geológicos distintos, mas os processos e ambientes de formação são similares.

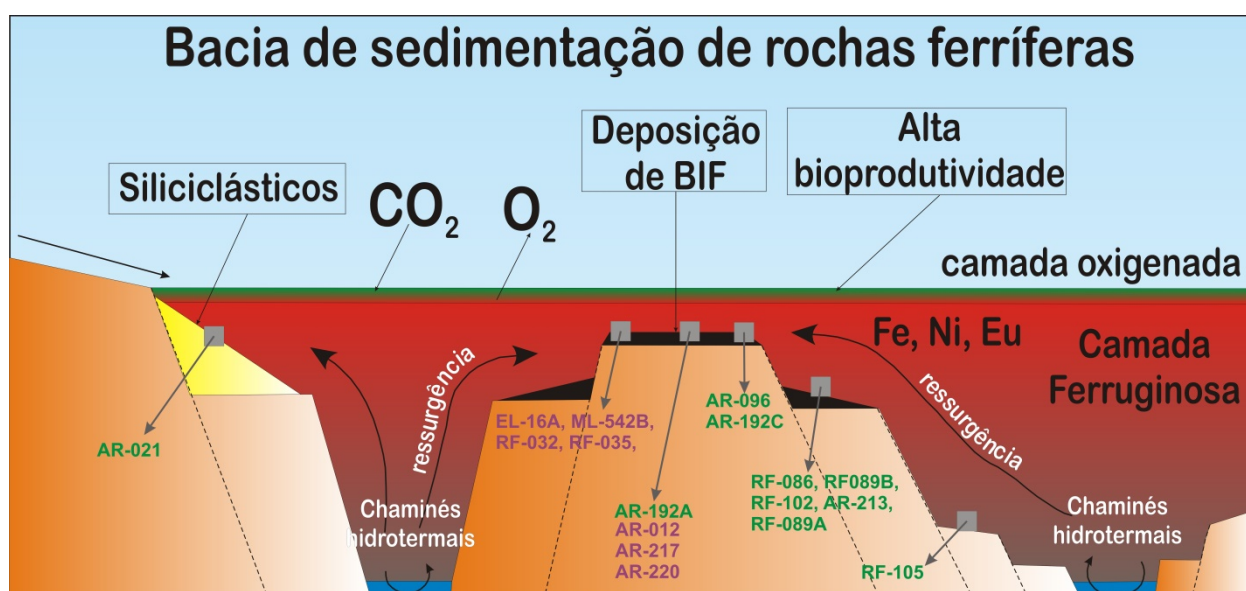


Figura 5.12 – Modelo deposicional proposto para as formações ferríferas granulares e bandadas estudadas nas áreas sudoeste e nordeste da Faixa Serido (compilado de Sial et al. 2015). O quadrado cinza claro representa a amostra coletada. Em verde estão identificadas as amostras de formações ferríferas bandadas (correlacionadas as rochas da Formação Jucurutu) e em roxo as formações ferríferas granulares (correlacionadas as rochas do Complexo Caicó). Notar que próximo ao continente às formações ferríferas apresentam componentes siliciclásticos diluídos. A deposição das formações ferríferas ocorre na camada ferruginosa do oceano (óxica) em sítios mais distais ou mais proximais as chaminés hidrotermais.

Capítulo 6

Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações Finais

6.1 – Considerações Finais sobre Petrografia e os Dados Litoquímicos

O estudo realizado nesse trabalho incluiu o agrupamento de formações ferríferas granulares, normalmente encaixadas em rochas do Complexo Caicó, além de formações ferríferas bandadas, que estão encaixadas em rochas da Formação Jucurutu, ambas nas regiões centrais e nordeste da Faixa Seridó. A petrografia e litoquímica de rocha foram utilizadas como ferramentas para buscar similaridades ou diferenças entre elas, além de analisar como ocorreu sua deposição.

Petrograficamente identificaram-se dois grupos distintos, separados pelas suas características texturais (homogêneas ou granulares e bandadas). Apresentam granulação fina a média e estrutura foliada ora visível, ora pouco visível. A composição mineralógica é simples, marcada pelo predomínio de quartzo, óxidos de ferro (magnetita e hematita) e anfibólios, que variam em percentual, permitindo subdividir ainda mais dois grupos de rochas para cada tipo textural, separadas por fácies minerais. As formações ferríferas granulares e bandadas com até 10% de anfibólios são de fácies óxidos e aquelas com 15-30% de anfibólios são de fácies óxido-silicato. A fácies óxido é mais comum nas formações ferríferas granulares que as fácies óxido-silicato, enquanto que ambas ocorrem com a mesma frequência nas formações ferríferas bandadas. Os minerais opacos são magnetita e hematita, a qual ocorre em grande parte como produto de martitização, provavelmente originada durante a evolução do metamorfismo à medida que água foi liberada nas reações metamórficas. Os anfibólios foram melhor caracterizados através do uso de MEV-EDS que permitiu identificar principalmente a presença de anfibólios cálcicos (actinolita, ferro-actinolita e ferro-edenita) e ferromagnesianos (grunerita), com a condição de cristalização conjunta de ambos minerais possível com a existência de componentes cálcicos durante a precipitação das rochas ferríferas. Biotita, muscovita e apatita foram observadas em formações ferríferas granulares e bandadas como minerais traço e uma amostra apresentou até 20% de microclínio (AR-021).

As associações minerais observadas são comuns aos dois grupos de rochas estudados. O crescimento de cristais de quartzo ocorre associado a cristais de

magnetita e anfibólios, mesmo quando o bandamento milimétrico típico da formação ferrífera bandada mostra a concentração de níveis mais ricos em quartzo, minerais opacos (magnetita e hematita) e anfibólios intercalados. As relações de inclusões minerais são variadas, pois quartzo, opacos e anfibólios ocorrem como inclusões uns nos outros, indicando diferentes gerações durante o metamorfismo. No geral, todo o conjunto observado é de associações minerais de grau metamórfico médio (xisto verde e anfibolito), com temperaturas que variam de 450 até 550°C e pressões que variam de 2 até 5 kbar.

Na sequência paragenética sugerida para as rochas ferríferas da área de estudo apenas nas formações ferríferas bandadas foi possível identificar duas gerações de magnetita, anfibólios e hematita, devido à presença de dobras geradas durante o metamorfismo progressivo. Devido o grau metamórfico sofrido por essas rochas, as assembleias minerais identificadas (quartzo + magnetita + hematita + anfibólios) podem apenas ser observadas durante o metamorfismo ou posteriormente. Apenas quartzo, hematita e hidróxidos de ferro foram identificados como minerais cristalizados em eventos pós-metamórficos (hidrotermalismo ou intemperismo).

Quanto à litoquímica das rochas ferríferas das áreas de estudo (polígonos nordeste e sudoeste), a análise dos elementos maiores permitiu identificar que as rochas ferríferas granulares e bandadas assemelham-se com os tipos Algoma e Rapitan do Canadá. SiO_2 e Fe_2O_{3T} somam mais de 90% nas amostras e apresentam uma correlação negativa ou antitética, resultado de uma caracterização petrográfica bimodal, representados por quartzo e minerais de ferro, principalmente óxidos e hidróxidos de ferro.

Apresentam valores baixos de elementos traços, não ultrapassando 100 ppm, com algumas exceções (Zn, Rb, Sr e Ba). O Fe_2O_{3T} é muito pouco correlacionado com os elementos traços, porém a correlação de Al_2O_3 , Na_2O , K_2O e TiO_2 é alta com os elementos incompatíveis. Provavelmente estão relacionados à deposição de clásticos de fonte terrígena que se transformaram em minerais como feldspato, biotita e anfibólios após o metamorfismo.

O gráfico de concentração de elementos traços normalizados pelo PAAS indica claramente o agrupamento de rochas com as amostras de formações ferríferas granulares apresentando um comportamento mais regular, com as mesmas anomalias positivas e negativas em relação ao PAAS. Porém as amostras de rochas ferríferas

bandadas apresentam dois conjuntos de amostras distintos. Um grupo apresenta as mesmas anomalias positivas e negativas das rochas ferríferas granulares, enquanto o outro apenas positivas de Mo e Pb. Porém todas as amostras de formações ferríferas bandadas apresentam uma anomalia discreta de Ni em relação ao PAAS, distinguindo-se das amostras de formações ferríferas granulares. Provavelmente as formações ferríferas bandadas foram geradas por lixiviação submarina de rochas máficas ou ultramáficas como sugerido por Sial et al. (2015).

Os teores dos elementos terras raras são baixos (teor máximo de 57 ppm e médio de 3 ppm), corroborando com aqueles observados nas BIF's fácies óxido de todo o mundo. Nas rochas ferríferas bandadas a concentração dos ETR é mais variada, pois as curvas de cada amostra apresentaram comportamento mais diversificado, corroborado com a variação mineralógica perante a variação percentual de anfibólios. As anomalias negativas de Ce e positivas de Eu são normalmente pronunciadas. Ocorre leve fracionamento dos ETRP, mas o comportamento é bem linear, sem fracionamento. Apenas a amostra AR-021 tem comportamento distinto de todo o grupo, porém é uma amostra com uma quantidade significativa de microclínio e leve alteração para argilominerais, de uma formação ferrífera com forte componente siliciclástico. O padrão de terras raras das rochas ferríferas granulares é mais consistente, indicando que as rochas são mais similares quimicamente. As concentrações de ETR são próximas. As rochas apresentam anomalia negativa de Ce e positiva e negativa de Eu, porém pouco pronunciadas (próximo de 1). O fracionamento dos ETRP é mais discreto, porém mais consistentes (curvas mais similares) que nas formações ferríferas bandadas.

As anomalias de Ce são predominantemente anomalias negativas verdadeiras, típicas de ambiente oxidante, exceto para amostra AR-021 e RF-089A, ambas de formação ferrífera bandada. As amostras AR-012 e AR-102 de formação ferrífera bandada e ML-542B de formação ferrífera granular apresentam anomalias positivas de La, que mascaram as anomalias negativas de Ce. Todas as outras amostras que estão dispersas no campo de anomalias negativas verdadeiras de Ce estão amplamente dispersas indicando representantes diversos de condições de oxidação da bacia, evidenciando ambientes transicionais entre os sítios deposicionais.

As anomalias positivas de Eu indicam que a maior parte das amostras de formação ferrífera bandada estão mais próximas de chaminés hidrotermais oceânicas,

enquanto as amostras de formações ferríferas granulares estão em porções mais distais. Nesse caso as anomalias são negativas (< 1) ou positivas próximas de 1.

Quanto à natureza da formação das rochas ferríferas, os gráficos binários com as relações entre Th, Zr e Ti, permitiram identificar que os grupos de formações ferríferas granulares e bandadas estudados neste trabalho são rochas puras quimicamente, com poucos níveis de impurezas, exceto a amostra AR-021 que teve presença de material siliciclástico durante a sua deposição. Diagramas binários de SiO_2 e Al_2O_3 e ternários de Al-Fe-Mn indicam que as amostras de formações ferríferas bandadas e granulares foram formadas pela ação de fluidos hidrotermais submarinos, ou seja configuram sedimentos químico-exalativos hidrotermais.

Os diagramas específicos para identificação dos ambientes tectônicos para formação das rochas ferríferas granulares e bandadas estudadas na Faixa Seridó indicam uma tendência ao campo de cadeias oceânicas localizadas nas imediações de margens continentais ativas transicionais a arcos de ilha. São condições parecidas com os modelos discutidos por Abrahão Filho (2016) para formações ferríferas bandadas no Arqueano e formações ferríferas bandadas por Sial et al. (2015) no Neoproterozoico.

As formações ferríferas granulares encaixadas nas rochas do Complexo Caicó são provavelmente paleoproterozoicas, enquanto as formações ferríferas bandadas estão encaixadas nas rochas da Formação Jucurutu de idade neoproterozoica. No primeiro caso sugere-se que as formações ferríferas granulares estão repousando sobre sequências de rochas metassedimentares correlatas ao Complexo Caicó. Mesmo ocorrendo provavelmente em períodos distintos, os dados observados sugerem que todo esse conjunto de amostras de rochas ferríferas granulares e bandadas foram depositados no mesmo contexto tectônico, de pequenas bacias marinhas rasas, em estágio avançado de fechamento, com forte influência de chaminés hidrotermais como proposto por Sial et al. (2015) e Abrahão Filho (2016). As formações ferríferas bandadas diferem ainda na presença de terrígenos em maior ou menor proporção, marcado pela variação mineralógica mais pronunciada de anfibólios, além da presença de Ni mais acentuada, indicando a lixiviação de rochas máficas ou ultramáficas em sistemas hidrotermais como observado por Sial et al. (2015).

Por fim, o modelo proposto para o contexto geológico, durante e após a deposição das formações ferríferas granulares e bandadas, encaixadas no Complexo

Caicó e Formação Jucurutu, respectivamente, depositadas em períodos distintos, porém sob condições similares, pode ser observado na figura 6.1.

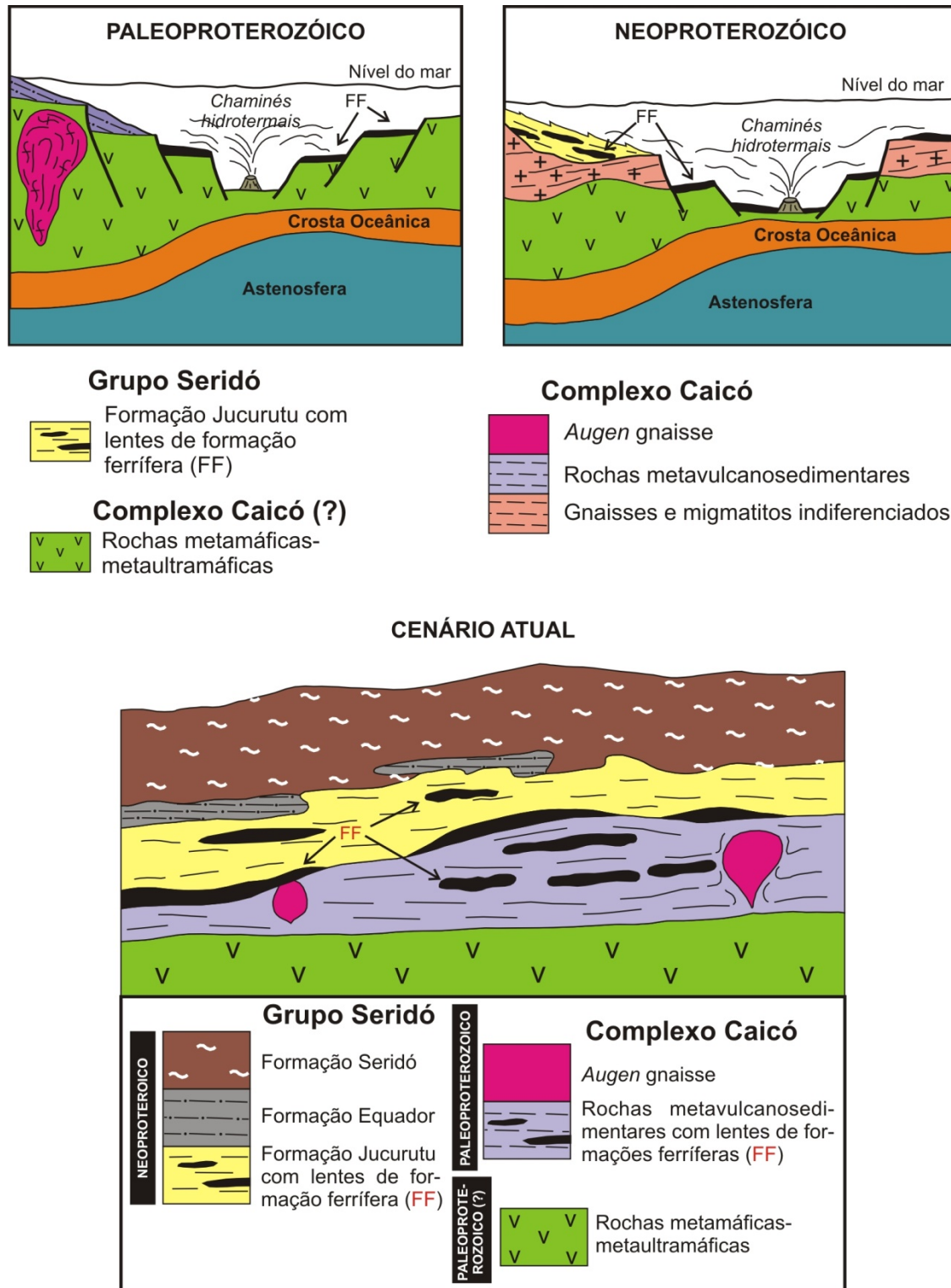


Figura 6.1 – Modelo deposicional proposto para as formações ferríferas granulares e bandadas, encaixadas, respectivamente, nas rochas do Complexo Caicó e Formação Jucurutu, das áreas de estudo na Faixa Seridó. O cenário atual indica a disposição geológica das rochas em perfil.

Em ambos os casos, sugere-se que uma bacia estreita desenvolveu-se primeiramente no Paleoproterozoico sobre um substrato de rochas metamáficas-metaultramáficas, em um período onde ocorreram simultaneamente a deposição de membros metavulcanossedimentares e intrusão de metaplutônicas do Complexo Caicó. Posteriormente, no Neoproterozóico, outras bacias desenvolveram-se sobre um substrato de rochas metamáficas-metaultramáficas e as rochas do Complexo Caicó. O aporte hidrotermal foi intenso nos dois períodos geológicos e a deposição das rochas ferríferas ocorreu em sítios distintos, ora mais distais, ora mais proximais as chaminés hidrotermais. Apenas uma amostra (AR-021) de formação ferrífera bandada indicou um maior aporte sedimentar durante a sua deposição.

6.2 – Recomendações Finais

Recomenda-se que seja realizado um mapeamento em escala de detalhe (1:10.000 ou 1:25.000) nos principais depósitos de ferro, com coleta sistemática de amostras em seções transversais na tentativa de estudar o zoneamento químico dessas rochas em superfície. Datações U-Pb podem ser realizadas coletando um volume maior de rochas na tentativa de isolar uma quantidade maior de zircões detriticos, especialmente nas porções silicosas de formações ferríferas bandadas. A necessidade da datação seria para confirmar as correlações estratigráficas sugeridas para as formações ferríferas granulares (Complexo Caicó) e as formações ferríferas bandadas (Formação Jucurutu).

Outra possibilidade seria realizar uma coleta de uma maior quantidade de dados de MEV-EDS para anfibólios e conseqüentemente definir qual deles é o mais comum e juntamente com mais análises em magnetitas tentar confirmar também os agrupamentos de formações ferríferas bandadas e granulares. Porém com a possibilidade do uso de microsonda eletrônica os dados serão mais robustos e as classificações minerais mais precisas.

*Referências
Bibliográficas*

Referências Bibliográficas

- Abrahão Filho E.A. 2016. A gênese das formações ferríferas e das rochas máficas associadas às rochas piroxeníticas da porção central do Maciço São José do Campestre, Rio Grande do Norte, Brasil. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 198 p.
- Adachi M., Yamamoto K., Sugisaki R. 1986. Hydrothermal chert and associated cherts from the Northern Pacific, their geological significance as indication of ocean ridge activity. *Sediment. Geol.*, **47**: 125–148.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B. 1976. The upper precambrian of South America. *Boletim IG/USP*, **7**: 45-80.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R. 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord., 9, *Resumos*, p.363-391.
- Anbar A.D. & Holland H.D. 1992. The photochemistry of manganese and the origin of banded Fe formations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**: 2595–2603.
- Appel P.W.U. 1987. Geochemistry of the Early Archean Isua Iron Formation, West Greenland. In: P.W.U. Appel & G.L. LaBerge (eds.) *Precambrian Iron-Formations*. Athens. Theophrastus Publications, p.: 31-69.
- Archanjo C.J., Oliver P.H., Bouchez J.L. 1992. Plutons granitiques du Seridó (NE du Brésil): écoulement magmatique parallèle à la chaîne révèle leur anisotropie magnétique. *Bull. Soc. Géol. France*, **163**: 509-520.
- Archanjo C.J., Trindade R.I.F., Bouchez J.L., Ernesto M. 2002. Granite fabrics and regional-scale strain partitioning in the Seridó belt (Borborema Province, NE Brazil). *Tectonics*, Vol. 21, 3-1 a 3-14.
- Angelim L.A.A., Nesi J.R., Torres H.H.F., Medeiros V.C., Santos C.A., Veiga Junior J.P., Mendes V.A. 2006. Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte: Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte Escala 1:500.000. Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), Recife, p. 119 + anexos.
- Azevedo A.F.C. 2016. Caracterização petrográfica e litoquímica de formações ferríferas do Estado do Rio Grande do Norte correlatas à Formação Jucurutu e ao Complexo Caicó, com implicações sobre a sua gênese. Relatório de Graduação. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 139p.
- Barbalho A.H.P. 1992. Geologia da Área da Serra do Feiticeiro e Riacho do Bonfim a Sudeste de Lages (RN). Relatório de Graduação. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 201p.
- Barbosa I.G. 2013. Mina do Bonito: tipologia e geoquímica dos minérios de ferro - Jucurutu/RN - Brasil. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, 194p.
- Barley M.E., Pickard A.L. and Sylvester P.J. 1997. Emplacement of a large igneous province as a possible cause of banded Fe formation 2.45 billion years ago. *Nature*, **385**: 55–58.
- Bau M. & Dulski P. 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, **79** (1-2): 37-55.
- Bau M. & Möller P. 1993. Rare earth element systematics of the chemically precipitated component in Early Precambrian iron-formations and the evolution of the terrestrial atmosphere–hydrosphere–lithosphere system. *Geochim. Cosmochim.*, **57** (10): 2239-2249.
- Baumgartner R., Romer R.L., Moritz R., Sallet R., Chiaradia M. 2006. Columbite-tantalite-bearing granitic pegmatites from the Seridó Belt, Northeastern Brazil: genetic constraints from U-Pb dating and Pb isotopes. *The Canadian Mineralogist*, **44**: 69-86.
- Bekker A., Holland H.D., Wang P.L., Rumble D., Stein H.J., Hannah J.L., Coetzee L.L. and Beukes N. J. 2004. Dating the rise of atmospheric oxygen. *Nature*: **427**: 117–120.

- Bekker A., Slack J.F., Planavsky N., Krapez 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**: p. 467-508.
- Bekker A., Krapez B., Slack J.F., Planavsky N., Hofmann A., Konhauser K.O., Rouxel O.J. 2012. Iron formation: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes - a reply. *Economic Geology*, **107**: 377-380.
- Beukes N.J. & Klein C. 1992. Models for iron-formation deposition. In: Shopf and Klein (eds.) *The Proterozoic Biosphere a multidisciplinary study*. New York, Cambridge University Press, p.: 147-152.
- Bonatti E. 1975. Metallogenesis at oceanic spreading centres. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **3**: 401-433.
- Braterman P.S., Cairnssmith A.G. and Sloper R.W. 1983. Photooxidation of hydrated Fe-2+ — significance for banded Fe formations. *Nature*, **303**: 163-164.
- Brito Neves B.B. 1983. O mapa geológico do Nordeste Oriental, escala 1:1.000.000. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 177p.
- Brito Neves B.B., Santos E.J., Van Schmus W.R. 2000. Tectonic History of the Borborema Province, Northeast Brazil. In: Cordani, U. G., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31ST IGC, p. 151-182.
- Brito Neves B.B., Campos Neto M.C., Van Schmus W.R., Santos E. J. 2001. O “Sistema Pajeú-Paraíba” e o “maciço” São José do Campestre no leste da Borborema. *Revista Brasileira de Geociências*, **31**: 173-184.
- Campos M.S. 2011. Químioestratigrafia isotópica de carbono e estrôncio e geoquímica de elementos terras raras em formações carbonáticas e ferríferas do cinturão Seridó, Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, CTG – Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 99 p.
- Campelo R.C. 1999. Análise de terrenos na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil: Integração de dados geológicos e gravimétricos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 130p.
- Canfield D.E. & Teske A. 1996. Late Proterozoic rise in atmospheric oxygen concentration inferred from phylogenetic and sulphur-isotope studies. *Nature*, **382**: 127-132.
- Cavalcante R., Cunha A.L.C., Medeiros V.C. 2015a. Programa Geologia do Brasil-PGB. Projeto Provincias Metalogenéticas do Brasil: Area PB – RN (Borborema Leste). Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. 1 mapa colorido, 90,00 x115,00cm. Escala 1:250.000.
- Cavalcante R., Dantas A.R., Medeiros V.C., Costa A.P., Cunha A.L.C. 2015b. Litoestratigrafia de um furo de sondagem no depósito de Fe do Saquinho (Cruzeta/RN). In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord., 26, CD-ROM.
- Chemale Junior F. & Takehara L. 2013. *Minério de ferro: geologia e geometalurgia*. Blucher, São Paulo, 202p. ISBN: 978-85-212-0741-2.
- Clout J.M.F. & Simonson B.M. 2005. Precambrian Iron Formations and Iron Formation-Hosted Iron Ore Deposits. *Economic Geology*, **100th anniversary volume**: 643-679.
- Cloud P.E. 1965. Significance of Gunflint (Precambrian) microflora photosynthetic oxygen may have had important local effects before becoming a major atmospheric gas. *Science*, **148**: 27-35.
- Costa A.P., Dantas A.R., Dreher A.M., Benedictus A., Jaime P., Riffel S.B. 2014. Petrographic characterization with Qemscan Analysis of Fe-Ti occurrence associated with ultramafic rocks in São tomé (RN), Brazil. In: Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral – Simexmin, 6, Ouro Preto. CD-ROM.

Costa A.P. & Dantas A.R. 2014. Programa Geologia do Brasil-PGB. Lajes. Folha SB.24-X-D-VI. Estado do Rio Grande do Norte. Carta Geológica. Recife: CPRM, 2014, 1 mapa colorido, 90,00 x 70,00cm. Escala 1:100.000.

Costa A.P., Dantas A.R., Oliveira R.G., Medeiros V.C. 2015a. Complexo Arábia: unidade Sideriana no Domínio Rio Piranhas - Seridó, NE do Brasil. *In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord.*, 26, CD-ROM.

Costa A.P., Dantas A.R., Medeiros V.C., Nascimento M.A.L. 2015b. Augen gnaisse Riachão de Riacho Salgado (Domínio Rio Piranhas - Seridó, NE do Brasil). *In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord.*, 26, CD-ROM.

Costa P.E.M. 2012. Caracterização petrográfica e litogeoquímica de elementos maiores de rochas metultramáficas-máficas e ferruginosas bandadas de uma área a NW de São Tomé/RN. Relatório de Graduação. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 60p + anexo.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Projeto Aerogeofísico Paraíba - Rio Grande do Norte; Pernambuco - Paraíba: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectométricos. Rio de Janeiro: Lasa Engenharia e Prospecções; Prospectores Aerolevantamentos e Sistemas, 2009. 37v il. Programa Geologia do Brasil (PGB).

Dantas A.R., Costa A.P., 2014. Programa Geologia do Brasil-PGB. Lajes. Folha SB.24-X-D-VI. Estado do Rio Grande do Norte. Carta de Recursos Minerais. Recife: CPRM, 2014, 1 mapa colorido, 91,0 x 67,0 cm. Escala 1:100.000.

Dantas E. L. 1988. Mapeamento geológico da região de Florânia – RN. Relatório de Graduação. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte/Departamento de Geologia, 270p.

Dantas E.L. 1992. Evolução tectono-magmática do maciço polidiapírico São Vicente/FlorâniaRN. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 272p.

Dantas E.L., Van Schmus W.R., Hackspacher P.C., Fetter A.H., Brito Neves B.B. de, Cordani U., Nutman A.P., Williams I.S. 2004. The 3.4-3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Research*, **130**: 113-127.

Dantas E.P., Cruz R.F., Nascimento M.A.L., Dantas, A.R. 2012. Programa Geologia do Brasil - PBG. Currais Novos. Folha SB.24-Z-B-II. Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Carta de Recursos Minerais. Recife: CPRM, 2012, 1 mapa colorido, 91,06 x 59,30 cm. Escala - 1:100.000.

Davy R. 1983. A contribution on the chemical composition of Precambrian Iron-Formations. *In: A.F. Trendall & R.C. Morris (eds.) Iron Formation Facts and Problems*. Amsterdam, Elsevier, p.: 325-343.

Dedavid B.A., Gomes C.I., Machado G. 2007. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. EDIPUCRS, Porto Alegre, 60 p. ISBN: 978-85-7430-702-2.

Delgado I.M., Souza J.D., Silva L.C., Silveira Filho N.C., Santos R.A., Pedreira A.J., Guimarães J.T., Angelim L.A.A., Vasconcelos A.M., Gomes I.P., Lacerda Filho J.V., Valente C.R., Perrotta M.M. e Heineck C.A. 2003. Geotectônica do Escudo Atlântico. *In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Textos, mapas e SIG*. (p. 264 – 281). Brasília/DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

Dorr J.V.N. 1964. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brasil. *Econ Geol*, **59**: 1203-1239.

Ebert H. 1962. Bastil and regional metamorfose in Prakambrischen grundgebirge brasiliens. *Tschermarks Min. U. Petr. Mitt.*, **8**: 49-81.

Edwards K.J., Rogers D.R., Wirsen C.O. and McCollom T.M. 2003. Isolation and characterization of novel psychrophilic, neutrophilic, Fe-oxidizing, chemolithoautotrophic alpha- and gamma-Proteobacteria from the deep sea. *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**: 2906–2913.

- Fandrich R., GU Y., Burrows D., Moeller K. 2007. Modern SEM-based mineral liberation analysis. *Internat. J. Min. Process.* **84**: 310–320.
- Fernandes N.H., Carvalho S.G., Zanardo A., Fernandes T.M.G. 2003. Grau metamórfico das formações ferríferas do *greenstone belt* Morro do Ferro: abordagem utilizando texturas de exsolução em anfibólios. *Geociências*, **22**: 53-63.
- Fernandes N.H., Carvalho S.G., Fernandes T.M.G. 2004. As Formações Ferríferas do *Greenstone Belt* Morro do Ferro no Sudoeste do Estado de Minas Gerais. *Revista de Geologia*, **17**, nº 1: 7-21.
- Ferreira C.A., Orikawa Y., Silva S.M.P. 1977. Projeto cadastramento dos recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Relatório Final. Recife: CPRM/ Governo do Estado do Rio Grande do Norte. 5v. il.
- Ferreira A.C.D., Dantas E.L., Souza V.S. 2015. Litogeoquímica das formações ferríferas bandadas da região de Lajes-RN, Terreno Rio Piranhas, Domínio Rio Grande do Norte, NE do Brasil. In: SBGq, Cong. Bras. de Geol., 15, *Resumos expandidos*.
- Figueiredo B.S. 2012. Geoquímica e gênese das formações ferríferas e metacarbonatos da porção sul do Maciço São José do Campestre, Província Borborema. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 108 p.
- Foustoukos D.I. & Bekker A. 2008. Hydrothermal Fe(II) oxidation during phase separation: relevance to the origin of Algoma-type BIFs. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**: A280.
- Garrels R.M. & Perry E.A. J. 1974. Cycling of carbon, sulfur, and oxygen through geologic time. In *The Sea* (ed. E. A. Goldberg). Wiley, New York.
- Goodwin A.M. 1973. Archean iron-formations and tectonic basins of the Canadian Shield. *Economic Geology*, **68**: 915-933.
- Goodwin A.M. 1982. Distribution and origin of precambrian banded iron formation. *Revista Brasileira de Geociências*, **12**, n. 1-3: 457-462.
- Gross G.A. 1961. Metamorphism of iron-formations and its bearing on their beneficiation. *Can. Min. Metall. Bull.*, **54**: 30-37.
- Gross G.A. 1965. Geology of iron deposits in Canada. *Geol. Survey Canada Econ. Geol. Rept.* 22, 1, 111p.
- Gross G.A. 1973. The depositional environments of principal types of Precambrian iron-formations. In: *Genesis of Precambrian Iron and Manganese Deposits*. UNESCO Earth Sci. Ser, 9: 15-21.
- Gross G.A. 1980. A classification of iron-formation based on depositional environments. *Canadian Mineralogist*, **18**: 215-222.
- Gross G.A. 1983. Tectonic systems and the deposition of iron-formation. *Precambrian Research*, **20**: 171-187.
- Gross G.A. & Mcleod C.R. 1980. A preliminary assessment of the chemical composition of iron formation in Canada. *Can. Mineral.*, **18**: 223-229.
- Haase C.S. 1982a. Metamorphic petrology of the Negaunee Iron Formation, Marquette district, northern Michigan: Mineralogy, metamorphic reactions and phase equilibria. *Econ. Geol.*, **77**: 60-81.
- Haase C.S. 1982b. Phase equilibria in metamorphosed iron-formations: qualitative T-X (CO₂) petrogenetic grids. *Am. J. Sci.*, **282**: 1623-1655.
- Habicht K.S., Gade M., Thamdrup B., Berg P. & Canfield D.E. 2002. Calibration of sulfate levels in the Archean Ocean. *Science*, **298**: 2372–2374.
- Hackspacher P. C. & Osorio A. A. 1981. Geologia do minério de ferro bandado de Saquinho, Serra da Formiga – RN. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord., 10, *Atas.*, p. 26–39.

- Hackspacher P.C., Van Schmus W.R., Dantas E.L. 1990. Um embasamento transamazônico na Província Borborema. *In: SBG, Cong. Bras. Geol.*, 36, vol. 6, p. 2683-2696.
- Harder E.C. 1919. Iron-depositing bacteria and their geological relations. *USGS Professional Paper*, **113**, 89p.
- Haskin L.A., Haskin M.A., Frei F.A., Wildman T.R. 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. *In: Ahrens L.H. (ed.), Origin and distribution of the elements, vol. 1.* Pergamon, Oxford, p.: 889-911.
- Holland H.D. 1973. Oceans - possible source of Fe in Iron-Formations. *Econ. Geol.*, **68**: 1169–1172.
- Holland H.D. 1984. *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans.* Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Holland H.D. 2005. 100th anniversary special paper: sedimentary mineral deposits and the evolution of earth's near-surface environments. *Econ. Geol.*, **100**: 1489–1509.
- Hollanda M.H.B.M., Archanjo C.J., Souza L.C., Liu D., Armstrong, R. 2011. Long-lived Paleoproterozoic granitic magmatism in the Seridó-Jaguaribe domain, Borborema Province–NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **32**: 287–300.
- Hollanda M.H.B.M., Archanjo C.J., Bautist J.R., Souza L.C. 2015. Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): Evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. *Precambrian Research*, **258**: 186–207.
- Ilouga D.C.I, Suh C.E., Tanwi G.R. 2013. Textures and Rare Earth Elements Composition of Banded Iron Formations (BIF) at Njweng Prospect, Mbalam Iron Ore District, Southern Cameroon. *Int. J. Scie. Res.*, **4**: 146-165.
- Isley A.E. & Abbott D.H. 1999. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded Fe formation. *J. Geophys. Res. (Solid Earth)*, **104**: 15461–15477.
- James H.L. 1954. Sedimentary facies of iron-formation. *Econ. Geol.*, **49**: 235-293.
- James H.L. 1955. Zones of regional metamorphism in the Precambrian of northern Michigan. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **66**: 1455-1487.
- James H.L. 1966. Chemistry of the iron-rich sedimentary rocks. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper* 440W, 60p.
- James H.L. 1983. Distribution of banded iron-formation in space and time. *In: A.F. Trendall and R.C. Morris (eds.) Iron Formations: Facts and Problems.* Elsevier, Amsterdam, p.: 471-490.
- James H.L. & Trendall A.F. 1982. Banded Iron-Formation: Distribution in time and paleoenvironmental significance. *In: Holland, H.D. & Schidlowski, M. (Ed). Mineral Deposits and the Evolution of the Biosphere*, p. 199–218. Springer Verlag, N.Y.
- Jardim de Sá E.F. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-Africana. IG/UnB, Brasília, Tese de Doutorado, 803p.
- Jardim de Sá E.F. & Salim J. 1980. Reavaliação dos conceitos estratigráficos na região do Seridó (RN-PB). *Mineração e Metalurgia*, Rio de Janeiro, v. 80, n. 421, p. 16-28.
- Jardim de Sá E. F. 1984. Geologia da região Seridó: reavaliação de dados. *In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord.*, 11, Atas do... *Boletim*, p. 278-296.
- Jardim de Sá E. F., Souza Z.S., Amaro V.E., Hollanda M.H.B.M. 1993. Estruturas tangenciais relacionadas à deformação transcorrente: exemplos na porção oriental da Faixa Seridó. *In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord.*, 15, *Boletim*, p. 269-272.

- Jardim de Sá E. F., Trindade R.I.F., Hollanda M.H.B.M., Araújo J.M.M., Galindo A.C., Amaro V.E., Souza Z.S., Vignerresse J.L., Lardeaux J.M. 1999. Brasiliano Syntectonic alkaline granites emplaced in a strike slip/extensional setting (Eastern Seridó Belt, NE Brazil). *An. Acad. Bras. Ciênc.*, **71**: 17-27.
- Johannesson K.H., Hawkins, D.L., Cortés A. 2006. Do Archean chemical sediments record ancient seawater rare earth element patterns? *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**: 871-890.
- Klein C. 1973. Changes in mineral assemblages with metamorphism of some banded iron-formations. *Economic Geology*, **68**: 1075–1088.
- Klein C. 1983. Diagenesis and metamorphism of Precambrian iron-formations. In: A.F. Trendall and R.C. Morris (eds.) *Iron-Formation: Facts and Problems*, Elsevier, Amsterdam, p.: 417–469.
- Klein C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. *American Mineralogist*, **90**: 1473-1499.
- Klein C. & Beukes N.J. 1992. Time distribution, stratigraphy, and sedimentologic setting, and geochemistry of Precambrian iron-formations. In Schopf, J. W. and Klein, C. (eds.) *The Proterozoic biosphere: A Multidisciplinary Study*. Cambridge: University of Cambridge, p.:139-146.
- Klein C. & Beukes N.J. 1993. Sedimentology and Geochemistry of the Glaciogenic Late Proterozoic Rapitan Iron-Formation in Canada. *Economic Geology*, **88**: 542-565.
- Konhauser K.O., Amskold L., Lalonde S.V., Posth N.R., Kappler A. and Anbar A. 2007. Decoupling photochemical Fe(II) oxidation from shallow-water BIF deposition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **258**: 87–100.
- Kump L.R. & Seyfried W.E. 2005. Hydrothermal Fe fluxes during the Precambrian: effect of low oceanic sulfate concentrations and low hydrostatic pressure on the composition of black smokers. *Earth Planet. Sci. Lett.*: **235**: 654–662.
- Leake B.E. et al. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*, **35**: 219-246.
- Legrand J.M, Liegeois J.P., Deutsch S. 1991. Datação U/Pb e Rb/Sr das rochas precambrianas da região de Caicó. Reavaliação da definição de um embasamento arqueano. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord., 14, Atas, p. 276-279.
- Liu Y.-G., Miah M.R.U., Achmitt R.A. 1988. Cerium: a chemical tracer for paleo-oceanic redox conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**: 1361-1371.
- McLennan S. M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin B.R. and McKay G.A. (eds.), *Geochemistry and Mineralogy of rare earth elements*. Reviews in Mineralogy, 21, p.: 169-200.
- Medeiros V.C. 2004. Evolução geodinâmica e condicionamento estrutural dos Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 200p.
- Medeiros V.C. & Dantas E.P. 2015. Geologia e Recursos Minerais da Folha Currais Novos, Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba: texto explicativo. 01 mapa geológico, 01 mapa de recursos minerais, escala 1:100.000. Org.-Recife: CPRM-RE. 154p.
- Medeiros V.C., Nascimento M. A. L., Sousa, D.C. 2010. Geologia. In: P.A.S. Pfaltzgraff e F.S.M. Torres. (Org.). *Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Norte*. 1ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2010, p.: 15-38.
- Medeiros V.C., Nascimento M.A.L., Galindo A.C., Dantas E. L. 2012a. Augen gnaisses riacianos no Domínio Rio Piranhas – Seridó, Província Borborema, Nordeste do Brasil. *Geologia-USP, Série Científica*, **12** (2):3-14.

Medeiros V.C., Nascimento M.A.L., Dantas E.L., Cunha A.L.C., 2012b. Programa Geologia do Brasil-PGB. Currais Novos. Folha SB.24-Z-B-II. Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Carta Geológica. Recife: CPRM, 2012, 1 mapa colorido, 91,04 x 65,79 cm. Escala 1:100.000.

Murray R.W. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications. *Sediment. Geol.*, **90**: 213-232.

Nascimento M.A.L., Antunes A.F., Galindo A.C., Jardim de Sá E.F., Souza Z.S. 2008 Geochemical signature of the Brasiliano-age plutonism in the Seridó Belt, Northeastern Borborema Province (NE Brazil). *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:161-164.

Nascimento M.A.L. e Medeiros V.C. 2008. Litofácies da Formação Jucurutu (porção basal do Grupo Seridó) na Folha Currais Novos (SB-24-Z-B-II), Domínio Rio Grande do Norte (Província Borborema, NE do Brasil). In: SBG, Cong. Bras. Geol., 44, *Anais*, p. 22.

Nascimento M.A.L., Galindo A.C., Medeiros V.C. 2015. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. *Journal of South American Earth Sciences*, **58**: 281–299.

Ohmoto H., Watanabe Y. and Kumazawa K. 2004. Evidence from massive siderite beds for a CO₂-rich atmosphere before, 1.8 billion years ago. *Nature*, **429**: 395–399.

Oliveira R.G. 2008. Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozoico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil). Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 411p.

Oliveira R.G. 2015. Interpretação de dados aerogeofísicos. In: Medeiros V.C. e Dantas E.P. *Geologia e Recursos Minerais da Folha Currais Novos, Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba: texto explicativo. 01 mapa geológico, 01 mapa de recursos minerais, escala 1:100.000*. Org.- Recife: CPRM-RE, p.: 123-127.

Oliveira R.G. & Santos E.J. 1999. Magnetic Framework of the Borborema Province, Northeast Brazil: na interpretation from digital data. In: SBGf, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 6th, Rio de Janeiro, Brazil, Potential Field Methods: Case Histories, SBGf113, 1 CD-ROM.

Oliveira R.G., Santos E.J. & Medeiros V.C. 2000. Magnetic and Gamma-ray Spectrometry Signatures from Terranes, Lineaments and Granitoids Rocks Belonging to the Proterozoic Structural Borborema Province, Northeast Brazil. In: International Geological Congress, 31th, Rio de Janeiro, General Symposia, Tectonic Evolution of South American Platform, *Poster Session*, 1 CD-ROM.

Osório H.A. 1981. Projeto ferro do Rio Grande do Norte. Relatório final integrado de pesquisa das ocorrências de ferríferas da Serra da Formiga – Cruzeta e Pico do Bonito – Jucurutu - RN. Natal: CDM. 2v. il. + anexos.

Pessoa J. 1986. Mapeamento geológico estrutural de uma área a NW de Cruzeta. Relatório de Graduação. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 139p.

Planavsky N., Bekker A., Rouxel O. J., Kamber B., Hofmann A., Knudsen A., Lyons T. W. 2010. Rare Earth Element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: new perspectives on the significance and mechanisms of deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74** (22): 6387-6405.

Poulton S.W., Fralick P.W. and Canfield D.E. 2004. The transition to a sulphidic ocean similar to 1.84 billion years ago. *Nature*, **431**: 173–177.

Quade H. 1976. Genetic problems and environmental features of volcano-sedimentary iron-ore deposits of the Lahn-Dill type. In: Wolf, K.H. (ed.). *Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposits*. V.7. Amsterdam: Elsevier, p. 255-294.

Ramdohr P. 1969. The ore minerals and their intergrowths. Pergamon Press, Oxford, 1174p.

- Raposo F.O. 1996. Formações ferríferas e metassedimentos químicos de áreas selecionadas do quadrilátero ferrífero e suas relações com níveis rudáceos. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 127p.
- Ray G.E. 1995. Fe Skarns, in Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles. In: Lefebure D.V., Ray G.E. (eds.) *Metallics and Coal*. V.1. British Columbia Ministry of Energy of Employment and Investment, p. 63-65.
- Ries A.C. & Shackleton R.M. 1977. Preliminary note on structural sequences and magnitude and orientation of finite strains in the Precambrian of Northeast Brasil. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord., 8, *Anais*, p. 393-396.
- Rodrigues S.W.O., Medeiros V.C., Brito Neves B.B., Marinho M. S., Oliveira R.G. 2011. Programa Geologia do Brasil - PGB. Campina Grande. Folha SB.25-Y-C-I. Estados da Paraíba e Pernambuco. Carta Geológica. Recife: CPRM, 2011, 1 mapa, colorido, 90,86 x 72,14cm. Escala 1:100.000.
- Roig H.L. & Dantas E.P. 2013a. Programa Geologia do Brasil - PBG. São José do Campestre. Folha SB.25-Y-A-I. Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Carta Geológica. Recife: CPRM, 2013, 1 mapa colorido, 91,06 x 59,30 cm. Escala - 1:100.000. Contrato CPRM 071/PR/2007-UnB.
- Roig H.L. & Dantas E.P. 2013b. Programa Geologia do Brasil - PBG. João Câmara. Folha SB.25-V-C-IV. Estado do Rio Grande do Norte. Carta Geológica. Recife: CPRM, 2013, 1 mapa colorido, 91,06 x 59,30 cm. Escala - 1:100.000. Contrato CPRM 071/PR/2007-UnB
- Roser B.P. & Korsch R.J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *J. Geol.*, **94**: 635-650.
- Salim J., Dardene M.A., Legrand J.M., Jardim de Sá E. F. 1979. Geologia, controle e gênese das mineralizações de scheelita no distrito de Lages (RN). In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. Nord., 9, *Anais*, p. 397-407.
- Sampaio N.P. 2016. Construção de Banco de Dados de Minerais Brasileiros para Analisador Mineral Integrado, acoplado a Sistema MEV-EDS Automatizado. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 66 p. + anexo.
- Santos E. J. 1996. Ensaio Preliminar sobre Terrenos e Tectônica Acrescionária na Província Borborema. In: SBG, Cong. Bras. de Geol., 39, *Anais*, **6**:47-50.
- Santos E.J., Coutinho M.G.N., Costa M.P.A. e Ramalho R. 1984. A Região de Dobramentos Nordeste e a Bacia do Parnaíba, incluindo o Cráton São Luís e as bacias marginais. In: Schobbenhaus C. (Coord.) *Geologia do Brasil: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais, escala 1:2.500.000*. DNPM, Brasília, p. 131-186.
- Santos E.J., Brito Neves B.B., Van Schmus W.R., Oliveira R.G., Medeiros V.C. 2000. An overall view on the displaced terrane arrangement of the Borborema Province, NE Brazil. In: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro. *Extended Abstract*, CPRM, 1 CD-ROM.
- Sial A.N., Campos M.S., Gaucher C., Frei R., Ferreira V.P., Nascimento R.C., Pimentel M.M, Pereira N.S., Rodler A. 2015. Algoma-type Neoproterozoic BIFs and related marbles in the Seridó Belt (NE Brazil): REE, C, O, Cr and Sr isotope evidence. *Journal of South American Earth Sciences*, **61**: 33-52.
- Silva Filho C.V.R. 2012. Isótopos de Nd aplicados à datação direta de formações ferríferas paleoarqueanas do Maciço São José do Campestre, Rio Grande do Norte-RN. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 86 p.
- Slack J.F., Grenne T., Bekker A., Rouxel O.J. and Lindberg P.A. 2007. Suboxic deep seawater in the late Paleoproterozoic: evidence from hematitic chert and Fe formation related to seafloor-hydrothermal sulfide deposits, central Arizona, USA. *Earth Planet. Sci. Lett.*: **255**, 243–256.
- Souza Z.S., Martin H., Peucat J.J., Jardim de Sá E.F., Macedo M.H.F. 2007 Calc- alkaline magmatism at the archaean-proterozoic transition: the Caicó Complex basement (NE Brasil). *Journal of Petrology*, **48** (11): 2149-2185.

Souza Z.S., Kalsbeek F., Deng X-D., Frei R., Kokfelt T.F., Dantas E.L., Li J-W., Pimentel M.M., Galindo A.C., 2016. Generation of continental crust in the northern part of the Borborema Province, northeastern Brazil, from Archaean to Neoproterozoic. *Journal of South American Earth Sciences*, **68**: 68-96.

Spier C.A., Oliveira, S.M.B., Sial A.N., Rios, F.J. 2007. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, **152**: 170-206.

Trendall A.F. 2002. The Significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record. In: W. Altermann & P.L. Corcoran. *Precambrian Sedimentary Environments: A modern approach to ancient depositional systems*. Bodmin, Blackwell Science, p.: 33 – 66. ISBN: 0-632-06415-3.

Trendall A.F. & Blockley J.G. 2004. Precambrian iron-formation. In: P.G. Eriksson, W. Altermann D.R. Nelson, Mueller W.U., O. Catuneanu (eds.). *The Precambrian Earth: Tempos and events*. Developments in Precambrian Geology. Elsevier, **12**: 403-421.

Van Schmus W.R., Brito Neves B.B., Hackspacher P.C., Babinsky M., Fetter A., Dantas E.L. 1995. Neoproterozoic and Late Mesoproterozoic sedimentary and volcanic sequences in the Borborema province, NE Brazil. In: SBG, Simp. Geol. Nord., 14, *Atas*, p. 391-392. (Boletim, 2).

Van Schmus W.R., Brito Neves B.B., Williams I.S., Hackspacher P.C., Fetter A.H., Dantas E.L., Babinski M. 2003. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U-Pb detrital zircon ages and Sm-Nd crustal residence (TDM) ages. *Precambrian Research*, **127**: 287-327.

Viehmann S., Bau M., Bühn B., Dantas E.L., Walde D.H.G. 2016. Geochemical characterisation of Neoproterozoic marine habitats: Evidence from trace elements and Nd isotopes in the Urucum iron and manganese formations, Brazil. *Precambrian Res. Manuscript*.

Wright J., Schrader H., Holser W.T. 1987. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite. *Geochim. Cosmochim Acta*, **51**: 631-644.

Young G.M. 1976. Iron-formations and glaciogenic rocks of the Rapitan Group, northwest Territories, Canada. *Precambrian Res.*, **3**: 137-158.

ANEXO

Artigo “PETROGRAFIA E LITOQUÍMICA DE ROCHAS FERRÍFERAS NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE (DOMÍNIO RIO PIRANHAS - SERIDÓ, NE DA PROVÍNCIA BORBOREMA)” submetido na revista Geologia USP em janeiro do ano de 2017.

PETROGRAFIA E LITOQUÍMICA DE ROCHAS FERRÍFERAS NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE (DOMÍNIO RIO PIRANHAS - SERIDÓ, NE DA PROVÍNCIA BORBOREMA)

PETROGRAPHY AND LITHOCHEMISTRY OF FERRIFEROUS ROCKS IN RIO GRANDE DO NORTE CENTRAL REGION (RIO PIRANHAS-SERIDÓ DOMAIN, BORBOREMA PROVINCE NORTHEAST).

PETROGRAFIA E LITOQUÍMICA DE ROCHAS FERRÍFERAS

Alexandre Ranier DANTAS^{1,2}, Marcos Antônio Leite do NASCIMENTO¹, Alan Pereira da COSTA² e Rogério CAVALCANTE²

- (1) Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Campus Universitário S/N, Lagoa Nova, Caixa Postal 1678, CEP: 59078-970, Natal/RN. E-mail: alexandre.dantas@cprm.gov.br; marcos@geologia.ufrn.br
- (2) CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Núcleo de apoio de Natal. Rua Prof. Antônio Henrique de Melo, 2010, Capim Macio, CEP: 59078-580, Natal/RN. E-mail: alan.costa@cprm.gov.br; rogerio.cavalcante@cprm.gov.br

Número de palavras: 12116

Total de figuras: 15

Total de Tabelas: 04

Resumo. As ocorrências de rochas ferríferas no Estado do Rio Grande do Norte correspondem essencialmente a pequenos depósitos que aparentemente não apresentam potencial econômico, porém pequenos jazimentos desse bem mineral tem sido explorados em algumas áreas dessa região. As formações ferríferas ocorrem como intercalações decimétricas a algumas dezenas de metros em gnaisses da Formação Jucurutu e menos frequentemente estão associadas às rochas metamáficas encaixadas em gnaisses do Complexo Caicó. Neste trabalho é apresentada uma caracterização petrográfica macro e microscópica de rochas ferríferas, além da discussão dos dados de litoquímica e uso de MEV-EDS para estudo da composição química qualitativa de magnetitas e anfibólios. Essas rochas normalmente apresentam teores de Fe_2O_3 variando entre 46 e 59% e de SiO_2 entre 33 e 50%. Petrograficamente identificou-se dois grupos distintos: rochas ferríferas granulares e rochas ferríferas bandadas, encaixadas respectivamente em rochas correlatas ao embasamento gnáissico-migmatítico (Complexo Caicó) e rochas supracrustais correlatas a Formação Jucurutu. A litoquímica permitiu concluir que os grupos de rochas estudadas apresentam comportamentos ora similares, ora distintos. São rochas bimodais, compostas essencialmente de Si e Fe, com pequena proporção de elementos traços e terras raras. Os parâmetros químicos indicam ambiente predominantemente oxidante e grupos de rochas em posições intermediárias a mais próximas das fontes hidrotermais oceânicas. Os ambientes tectônicos para formação das rochas ferríferas granulares e bandadas estudadas indicam principalmente tendências a cadeias oceânicas localizadas nas imediações de margens continentais ativas transicionais a arco de ilhas.

Palavras-chave. Formações ferríferas; Petrografia; Litoquímica; Faixa Seridó; Rio Grande do Norte

Abstract.

Ferriferous rocks occurrences in Rio Grande do Norte central region essentially correspond to small deposits without apparent economic potential, but small deposits of this mineral has been well exploited in some areas of the region. The iron formations occur as decimeters to tens of meters layers intercalated with the Jucurutu Formation gneiss, but less frequently, with metamafic rocks hosted in the gneiss from Caico Complex. In this work will be performed a macroscopic and microscopic petrographic characterization of banded iron rocks thin sections, besides the discussion of lithochemochemistry data and the use of MEV-EDS to study the qualitative chemical composition of magnetites and amphiboles. These rocks are formed by Fe_2O_3 content ranging between 46 and 59% and SiO_2 content ranging between 33 and 50%. Petrographically it were identified two distinct groups of ferriferous rocks: granular and banded. They occur interlayered respectively, into the migmatitic gneisses from Caicó Complex and in the supracrustal rocks correlated to the Jucurutu Formation. The lithochemochemistry permitted to conclude that groups of granular and banded iron rocks sometimes present a similar behavior, sometimes not. The bimodal rocks are mainly composed of Si and Fe, with small proportion of trace and rare earths elements. The chemical parameters indicate dominantly oxidant environment and groups of rocks, rocks, since intermediate positions to closest the oceanic hydrothermal vents. The tectonic environments for the formation of granular iron rocks and banded iron rocks studied indicate mainly oceanic chains located next to active continental margins transitional to island arc.

Keywords. Iron formations, petrography, lithochemistry, Seridó Belt; Rio Grande do Norte.

1 INTRODUÇÃO

O estudo das formações ferríferas é importante não apenas por concentrarem a maior fonte econômica de ferro nas rochas, mas são particularmente essenciais para o entendimento da evolução atmosférica, a composição química dos oceanos e o surgimento de vida na Terra (Spier et al., 2007).

As ocorrências de formações ferríferas encaixadas em rochas correlatas à Formação Jucurutu e aquelas que ocorrem em rochas do embasamento gnáissico-migmatítico (correlatas ao Complexo Caicó) podem contribuir, através de petrografia e química de rocha, para o entendimento da evolução litosférica da região e suas relações com sistemas mineralizantes, sejam eles magmáticos

e/ou magmático-hidrotermal (depósitos vulcano-exalativos, de skarn, entre outros), ajudando na contextualização dessas ocorrências minerais dentro do Domínio Rio Piranhas – Seridó (Angelim et al. 2006), na porção sententrional da Província Borborema.

Os objetivos principais deste trabalho compreendem: (i) Realizar uma caracterização petrográfica macro e microscópica, incluindo análise química mineral semiquantitativa; (ii) Identificar o comportamento químico distinto entre as rochas ferríferas encaixadas nas rochas supracrustais (Formação Jucurutu) e no embasamento (Complexo Caicó); (iii) Analisar os elementos maiores buscando similaridades químicas com as formações ferríferas típicas, fazendo o estabelecimento de sua faciologia, na tentativa de contextualizar as formações ferríferas (FF's) do tipo Algoma ou Superior de Gross e Mcleod (1980) e FF's do tipo Rapitan de Klein e Beukes (1993); (iv) Estudar a assinatura dos elementos traços e terras raras para definição de protólitos e ambiente tectônico.

2 GEOLOGIA REGIONAL E DA ÁREA

As áreas de estudo (Figura 1) estão situadas na porção leste do Domínio Rio Piranhas-Seridó (DPS). Segundo Angelim et al. (2006) o DPS corresponde a porção da Faixa Seridó de Jardim de Sá (1994) situada a oeste da zona de cisalhamento Picuí-João Câmara, ao Terreno Seridó de Campelo (1999) e aos terrenos Rio Piranhas e Faixa Seridó de Brito Neves et al. (2000). Está limitado tectonicamente a oeste pelo Domínio Jaguaribeano através da zona de cisalhamento Portalegre, considerada como uma sutura transcorrente/transformante brasileira, e a leste pelo Domínio São José do Campestre por meio da zona de cisalhamento Picuí-João Câmara. Compreende um embasamento, ora referido como Embasamento Rio Piranhas (ERP) e uma cobertura de rochas supracrustais correspondente à Faixa Seridó (FSE). Essas rochas são cortadas por corpos granitoides ediacaranos e rochas vulcânicas básicas relacionadas aos magmatismos Macau e Rio Ceará-Mirim. Na região ainda ocorrem as coberturas sedimentares cenozoicas.

O embasamento (ERP) das rochas supracrustais é reportado por Jardim de Sá (1994) como ortognaisses equigranulares ou augen, anfíbolitos e rochas metavulcânicas e metassedimentares. Esses ortognaisses variam de gabro-diorítico a granítico, de quimismo cálcio-alcálico de alto potássio, com idade variando entre 2,25 e 2,15 Ga (Souza et al. 2007, Hollanda et al. 2011, Medeiros et al. 2012a), interpretados como derivados do manto enriquecido em um contexto de acreção crustal (Souza et al., 2007).

A Faixa Seridó corresponde às rochas supracrustais do Grupo Seridó, que é constituído por uma unidade basal formada principalmente por paragnaisses, com intercalações de mármore e rochas calciossilicáticas (Formação Jucurutu), uma intermediária composta por quartzitos e metaconglomerados (Formação Equador) e uma superior essencialmente constituída por micaxistos (Formação Seridó) (Jardim de Sá e Salim, 1980). Segundo Van Schmus et al. (2003) as datações U-Pb em zircões detríticos mostraram idades mínimas em torno de 650 Ma como provável idade para a deposição do Grupo Seridó. Hollanda et al. (2015) indicaram que a proveniência dos metapelitos no topo da sucessão metassedimentar que constitui o Grupo Seridó inclui uma população proeminente de zircões criogenianos com os grãos mais jovens datados entre 640 e 620 Ma. A deposição deste grupo teria cessado em 600 Ma, pela indicação de plutons graníticos intrusos nessas rochas.

As ocorrências de rochas ferríferas na região central do Rio Grande do Norte ocorrem como intercalações decimétricas a algumas dezenas de metros em gnaisses da Formação Jucurutu, na base do Grupo Seridó. Menos frequentemente estão associadas às rochas metamáficas encaixadas em gnaisses do Complexo Caicó e possíveis rochas ortoderivadas. Basicamente, nas regiões de estudo (Figura 1) é possível distinguir três tipos principais de rochas ferríferas:

a) Ocorrências de formações ferríferas de provável origem sedimentar encaixadas na Formação Jucurutu;

b) Formações ferríferas descontínuas encaixadas no embasamento paleoproterozoico; e

c) Rochas metamáficas – metaultramáficas possivelmente relacionadas a depósitos (orto)magmáticos de óxidos de Fe-Ti.

Os dois primeiros casos (a, b) são alvo deste estudo. São rochas compostas basicamente de quartzo, óxidos e hidróxidos de ferro, anfibólios (membros da série cummingtonita-grunerita e tremolita-actinolita), de granulação fina a média e textura dominante granomatoblástica, homogêneas ou com bandamento composicional.

Os mapas geológicos simplificados das áreas sudoeste (Figura 2) e nordeste (Figura 3) foram baseados principalmente em Medeiros et al. (2012b), Costa e Dantas (2014) e Cavalcante et al. (2015). Mostram a distribuição das rochas ferríferas no contexto das áreas de estudo.

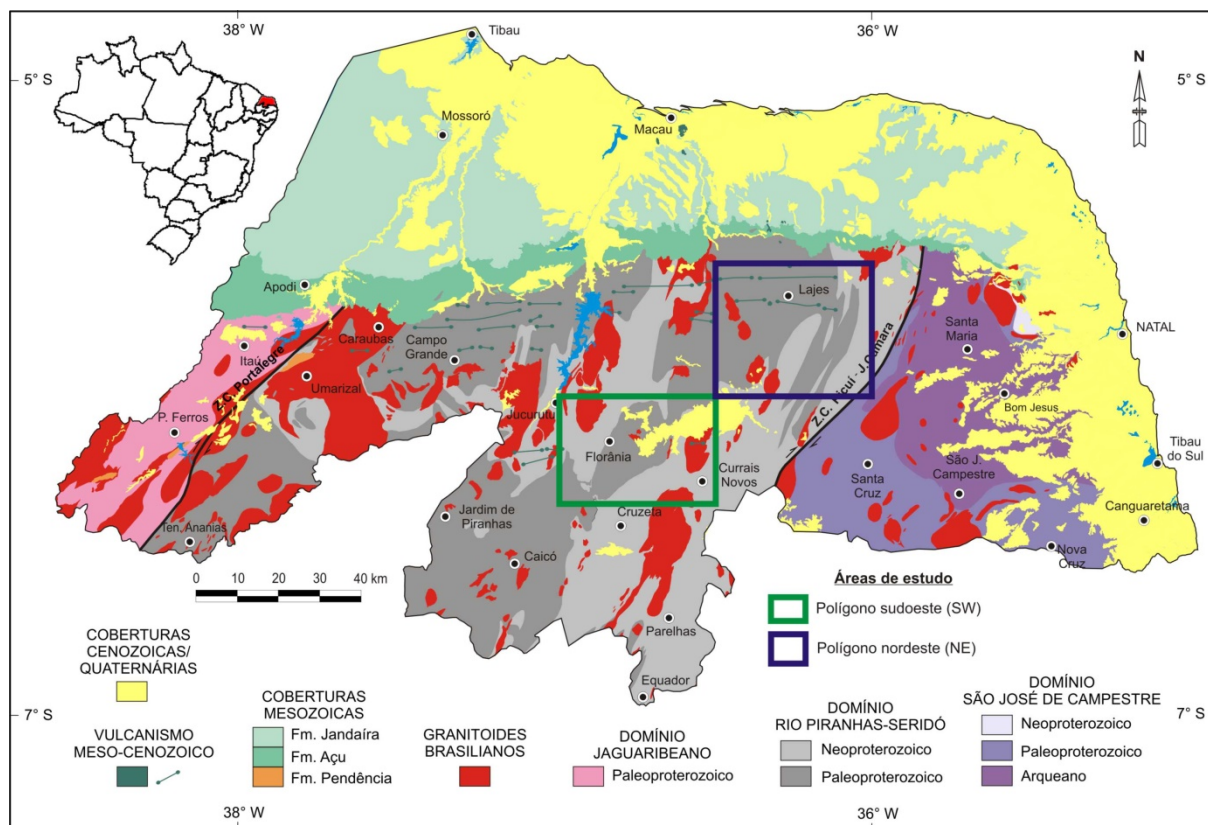


Figura 1 – Compartimentação tectônica do estado do Rio Grande do Norte (Medeiros et al. 2010), com a localização das áreas de estudo (polígonos sudoeste e nordeste).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida neste trabalho inclui revisão bibliográfica sobre o tema estudado, aquisição de amostras de rochas ferríferas para estudo de química de rocha e petrografia, estudo de lâminas delgadas e seções polidas, além do tratamento dos dados. As amostras foram adquiridas em afloramentos através de mapeamentos geológicos sistemáticos na escala de 1:100.000 e levantamento de recursos minerais das folhas Lajes e Currais Novos já executados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Através desses mapeamentos foram identificados uma quantidade significativa de ocorrências de rochas ferríferas (Dantas et al. 2012; Dantas e Costa, 2014) com o cadastramento de 48 ocorrências minerais. Junto com este trabalho foi coletado um total de 17 amostras para litoquímica e confecção de lâminas delgadas, polidas e seções polidas.

As amostras de rocha coletadas em afloramentos foram enviadas para preparo e análise química de multi-elementos no laboratório da ACME - Analytical Laboratories Ltda e SGS Geosol Laboratórios Ltda. Em ambos os casos os elementos maiores, menores e traços foram analisados, após fusão por metaborato e digestão ácida (água régia), em espectrômetro de plasma acoplado (ICP-MS). Algumas amostras tiveram os óxidos analisados por fluorescência de raios X (XRF) após fusão por metaborato.

A pesquisa bibliográfica focou em trabalhos prévios existentes no âmbito do Rio Grande do Norte (Campos, 2011; Figueiredo, 2012; Silva Filho, 2012; Ferreira et al., 2015; Sial et al. 2015; Abrahão Filho, 2016), além de exemplos brasileiros e mundiais pesquisados simultaneamente.

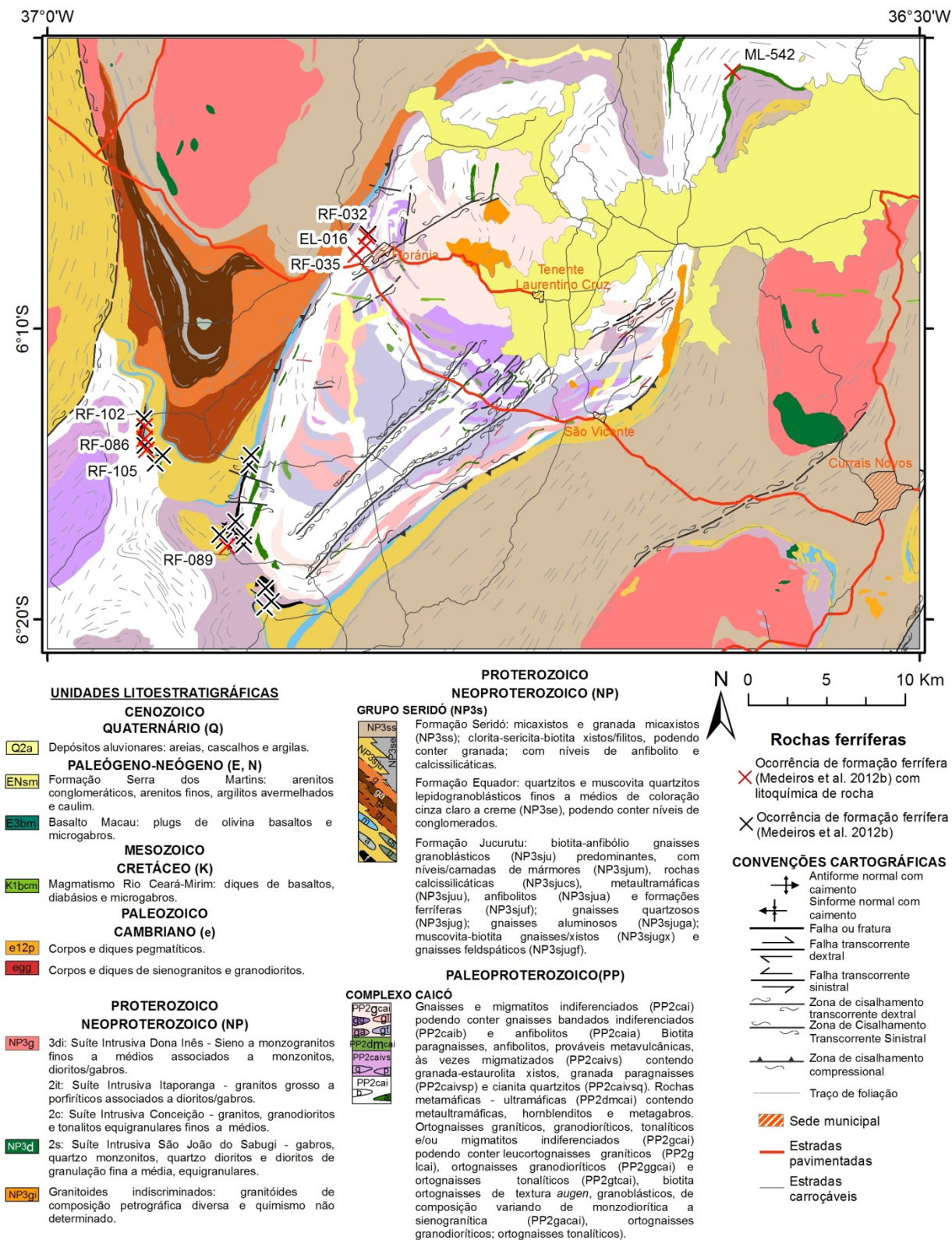


Figura 2 – Mapa geológico simplificado da área de estudo sudoeste com a localização das ocorrências minerais de formação ferrífera e os pontos de ocorrência mineral com coleta de amostra para litoquímica (compilado de Medeiros et al. 2012b e Cavalcante et al. 2015). Datum WGS84, Zona 24-Sul.

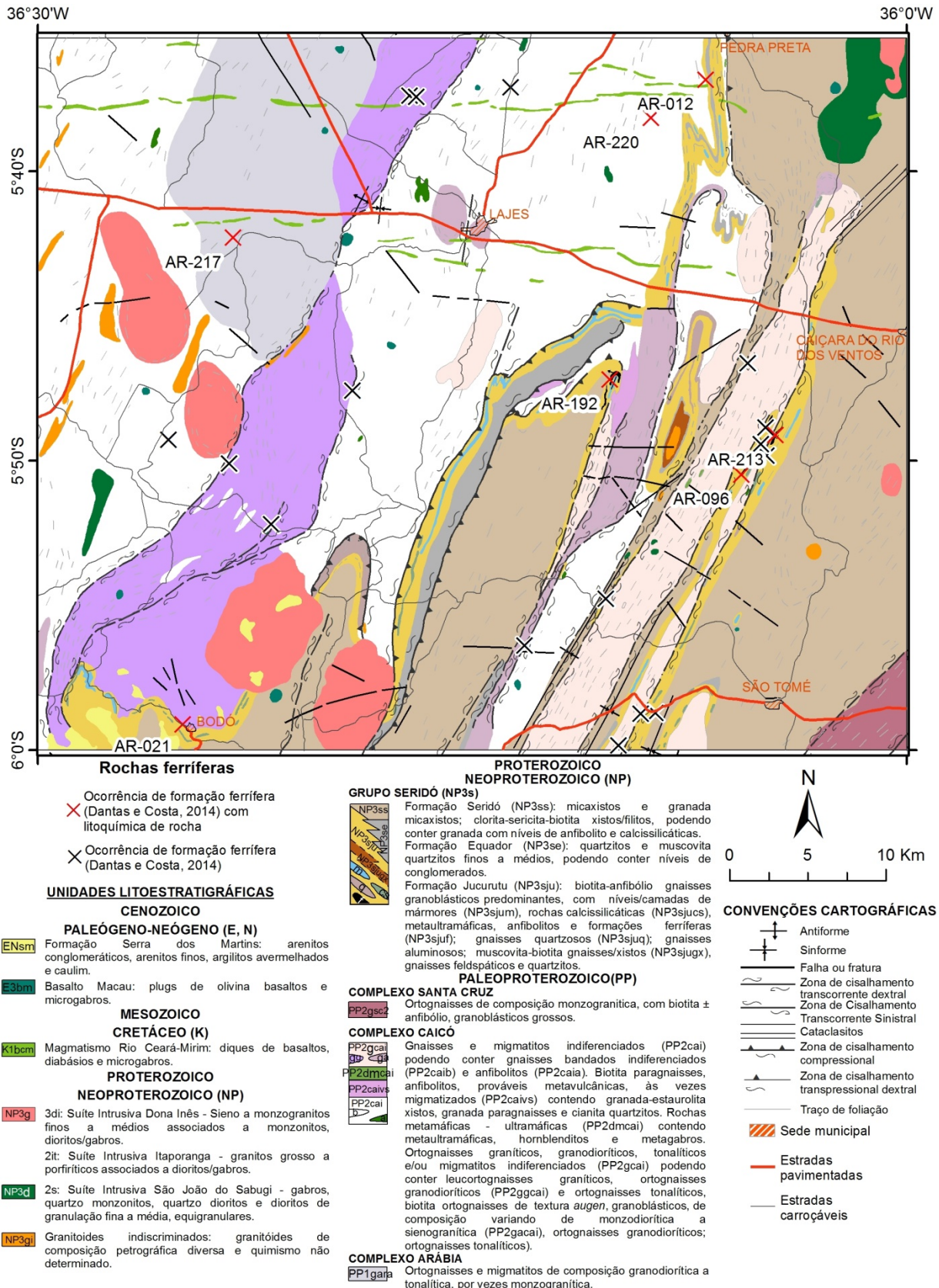


Figura 3 – Mapa geológico simplificado da área de estudo nordeste com a localização das ocorrências mineras de formação ferrífera e os pontos de ocorrência mineral com coleta de amostra para litoquímica (compilado de Costa e Dantas 2014, Dantas e Costa 2014, Cavalcante et al. 2015). Datum WGS84, Zona 24-Sul.

As lâminas delgadas, polidas e seções polidas foram descritas em microscópio óptico de luz transmitida e refletida da marca Olympus BX-51 e software de captura de imagem Analysis, com lentes de aumento de 2x até 40x. Desse conjunto, um total de quatro lâminas polidas e duas seções polidas foram utilizadas para identificação da composição química mineralógica dos tipos de anfibólios e de óxidos de ferro (magnetitas ou hematitas) através de MEV (microscópio eletrônico de varredura) e EDS (sistema de energia dispersiva).

Para a identificação através de imagens e análises químicas minerais semiquantitativas, respectivamente, com o uso do MEV e EDS, utilizou-se o equipamento de bancada TM3000 com o espectrômetro de energia dispersiva acoplado do modelo Quantax 70, ambos da Hitachi, no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). As análises foram feitas usando voltagem de 5 e 15 kV com filamento de tungstênio, 30 nm de resolução e leitura no EDS de 45 segundos por análise. Esse equipamento possui modo de redução de carga, que utiliza pressão de câmara mais elevada, permitindo a obtenção de imagens de amostras não revestidas.

Para o estudo de litoquímica os dados foram interpretados para elementos maiores, traços e terras raras, utilizando diagramas que reportam composição química e condições paleoambientais dos grupos de rocha analisados.

4 RESULTADOS

4.1 PETROGRAFIA DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS

Um conjunto de dados de 18 lâminas delgadas, 5 lâminas polidas e 4 seções polidas de rochas ferríferas encaixadas no embasamento (Complexo Caicó) e Formação Jucurutu serão apresentadas neste item. Incluirá a descrição microscópica de ocorrências de formações ferríferas encontradas nos municípios de Lajes, Caiçara do Rio dos Ventos, São Tomé, Bodó e Santana do Matos na porção nordeste da Faixa Seridó, além dos municípios de Cruzeta, Caicó e Florânia na porção central da Faixa Seridó, todas no Estado do Rio Grande do Norte e localizadas respectivamente nas áreas de estudo polígonos NE e SW.

Dois grupos são separados macroscopicamente: rochas ferríferas com aspecto mais homogêneo, de textura granular e rochas ferríferas tipicamente bandadas (Figura 4). Estão correlacionadas, respectivamente, às rochas encaixadas no Complexo Caicó e Formação Jucurutu, base do Grupo Seridó.

Todas as rochas descritas neste trabalho são de origem metamórfica e em alguns casos apresentam uma foliação incipiente (Figura 4A). Em outras situações, o aspecto textural da rocha parece maciço, homogêneo (Figura 4B, 4C e 4G). Poderiam ser classificadas como formação ferrífera granoblástica, considerando esse aspecto textural tão marcante. Porém Trendall (2002) sugere o uso do termo formação ferrífera granular (FFG ou GIF em inglês) como unidade litológica, assim como às formações ferríferas bandadas (FFB ou BIF em inglês), que é uma denominação clássica. As formações ferríferas granulares podem ser consideradas equivalentes de águas rasas das formações ferríferas bandadas de origem em águas profundas (Beukes e Klein, 1992).

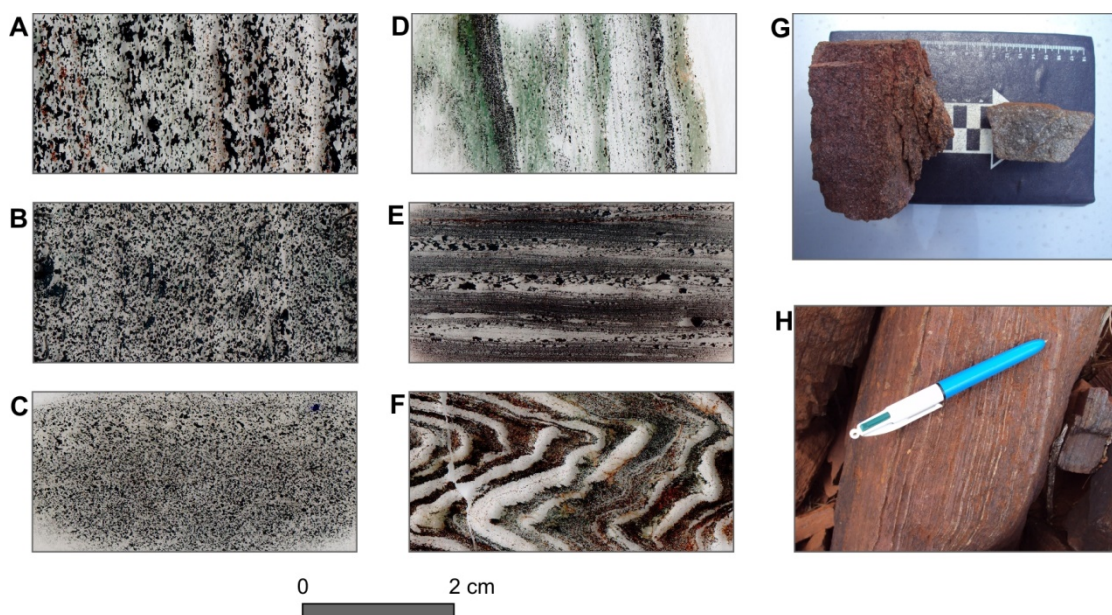


Figura 4 – Foto das lâminas delgadas das amostras (A) AR-R-012, (B) EL-16A, (C) RF-035, (D) AR-R-096, (E) RF-102 e (F) AR-R-192A seção XZ. Foto das amostras de mão (G) AR-217 e (H) AR-096. As amostras dos itens A, B, C e G representam as formações ferríferas granulares. Os itens D, E, F e H são as formações ferríferas bandadas. Em transparente destaque para os níveis de quartzo, grãos e níveis em preto são os minerais opacos (magnetita e/ou hematita) e esverdeados são os anfibólios.

4.1.1 ROCHAS FERRÍFERAS GRANULARES (COMPLEXO CAICÓ)

Em escala de mão, as rochas ferríferas granulares (Figura 5A) apresentam coloração cinza escura a preta, com pontos esbranquiçados. Ora com estrutura foliada visível, ora pouco visível. Desenvolvem textura granoblástica a nematogranoblástica, com granulometria fina a média, mais raramente grossa. As condições metamórficas são estimadas em fácies xisto verde superior a anfibolito inferior envolvendo a cristalização de anfibólios e biotita. São compostas por quartzo (45-55%), anfibólios (5-10%) de cores esverdeadas, amarronzadas e menos frequente incolores, minerais opacos (40-45%) ocorrendo como grãos isolados intergranulares ou formando agregados e hidróxidos de ferro (<1%) crescendo a expensas dos minerais opacos e anfibólios. A biotita e apatita ocorrem como traço em apenas duas amostras do grupo de formações ferríferas granulares.

No grupo de amostras estudadas, a grande maioria apresenta pouco (até 10%) ou nenhum anfibólio. Porém em duas amostras os anfibólios constituem entre 15 e 25% dos minerais da formação ferrífera granular. Nesses casos é comum a presença de anfibólio substituindo a magnetita, produzindo localmente a textura poiquiloblástica com inclusões de minerais opacos e quartzo. O inverso também ocorre, justificando o intercrescimento de minerais opacos *versus* anfibólio.

As seções polidas indicam que grande parte dos minerais opacos é hematita, com magnetita subordinada. A martitização (ou oxidação da magnetita para hematita) da magnetita é intensa (Figura 5B) e invade os cristais pelas bordas e fraturas, deixando restos de magnetita inalterada apenas no núcleo dos cristais.

Considerando as relações minerais observadas sugerem-se as seguintes assembleias em ordem cronológica, a partir da mais antiga:

- (1) Minerais opacos (magnetita) + quartzo + anfibólio + biotita + apatita (foliação)
- (2) Minerais opacos (magnetita + hematita) + quartzo + anfibólio (crescimento tardi- a pós-foliação)
- (3) Quartzo + minerais opacos (magnetita + hematita) (exsudados)
- (4) Hidróxidos de ferro (matriz e fissuramento).

4.1.2 ROCHAS FERRÍFERAS BANDADAS (FORMAÇÃO JUCURUTU)

Macroscopicamente são rochas mesocráticas, de cor cinza escura a preta, finas a grossas, de estrutura foliada e bandada. O bandamento é milimétrico, do tipo claro (predominantemente quartzo) e escuro (minerais de ferro+quartzo) (Figura 5C). As bandas claras variam de 1 a 5 mm enquanto as bandas escuras apresentam de 1 a 3 mm em média. Por vezes os anfibólios estão mais concentrados em algumas faixas (Figura 5C) formando bandas de coloração esverdeada, exibindo textura nematoblástica, enquanto as faixas mais ricas em quartzo ou minerais opacos exibem uma textura granoblástica. Apresentam dois grupos de formações ferríferas bandadas que diferem no maior ou menor percentual de anfibólios. São compostas de quartzo (30-40%), anfibólio entre 20 e 30% em um grupo de amostras e em outro não ultrapassa 5% ou é ausente, de cores variando de incolores a esverdeadas ou azuladas claras, além de minerais opacos (30-55%) formando agregados e também como grãos isolados. Muscovita e apatita ocorrem como mineral traço (< 1%).

Em algumas amostras a tremolita-actinolita pode representar a maioria dos anfibólios presentes, constituindo de 10 até 25% da composição modal da rocha. A tremolita-actinolita fibrosa pode ainda ocorrer intercrescida com cristais aciculares de grunerita incolor, com maclas polissintéticas, tanto em cristais finíssimos situados em meio ao quartzo das bandas quartzosas, como em cristais de feixes maiores (até 1 mm de comprimento) junto às bandas de magnetita. Mostra alteração forte para material ferruginoso (goethita), particularmente ao longo das bordas e clivagens de alguns cristais.

Hematita em quantidade um pouco maior que magnetita é o mineral opaco mais comum identificado nas seções polidas. Os cristais de magnetita mostram uma martitização moderada a forte (Figura 5D), na forma de agulhas de hematita que invadem a magnetita a partir das bordas e se dispõem segundo as direções cristalográficas da magnetita.

As porções maciças de formações ferríferas bandadas chegam até 80% de minerais opacos, com menor proporção de quartzo (até 15%), anfibólio (5%) e hidróxidos de ferro (< 1 %). Apresenta particularmente uma quantidade expressiva de hematita especular (especularita) (Figura 5E), com menor proporção de magnetita, que ocorre associada ou inclusa nesse mineral (Figura 5F). Identifica-se no mínimo duas fases de cristalização de specularita quando a formação ferrífera está dobrada. Os cristais mais antigos alinham-se segundo a superfície Sn (níveis dobrados), enquanto os mais novos alinham-se segundo a superfície Sn+1 de plano axial (Figura 5E).

Associados aos minerais opacos observam-se estruturas avermelhadas de hábito acicular, orientadas ao longo da foliação, contato de fases minerais e no preenchimento de microfaturas. Provavelmente são hidróxidos de ferro (goethita) (< 2%) e argilominerais preenchendo planos de foliação.

Na amostra AR-021 foi observado até 20% de microclínio, de até 1,8 mm. O mineral exibe maclas em xadrez mal definidas e apresenta leve alteração para argilo-minerais e impregnação por hidróxido de ferro (goethita) ao longo das bordas e clivagens. Provavelmente corresponde a uma formação ferrífera com maior aporte de terrígenos.

Considerando as relações minerais observadas sugerem-se as seguintes assembleias em ordem cronológica, a partir da mais antiga:

- (1) Minerais opacos (magnetita + hematita) + quartzo + anfibólios + muscovita (foliação Sn)
- (2) Minerais opacos (magnetita + hematita) + quartzo + anfibólios (plano axial Sn+1)
- (3) Quartzo + Minerais opacos (magnetita + hematita) (exsudados)
- (4) Hidróxidos de ferro (fissuramento e intemperismo ?).

Para as formações ferríferas bandadas sem presença de anfibólios, desconsiderá-los nas relações acima. Porém para os outros minerais, as relações são comuns a ambos os tipos litológicos.

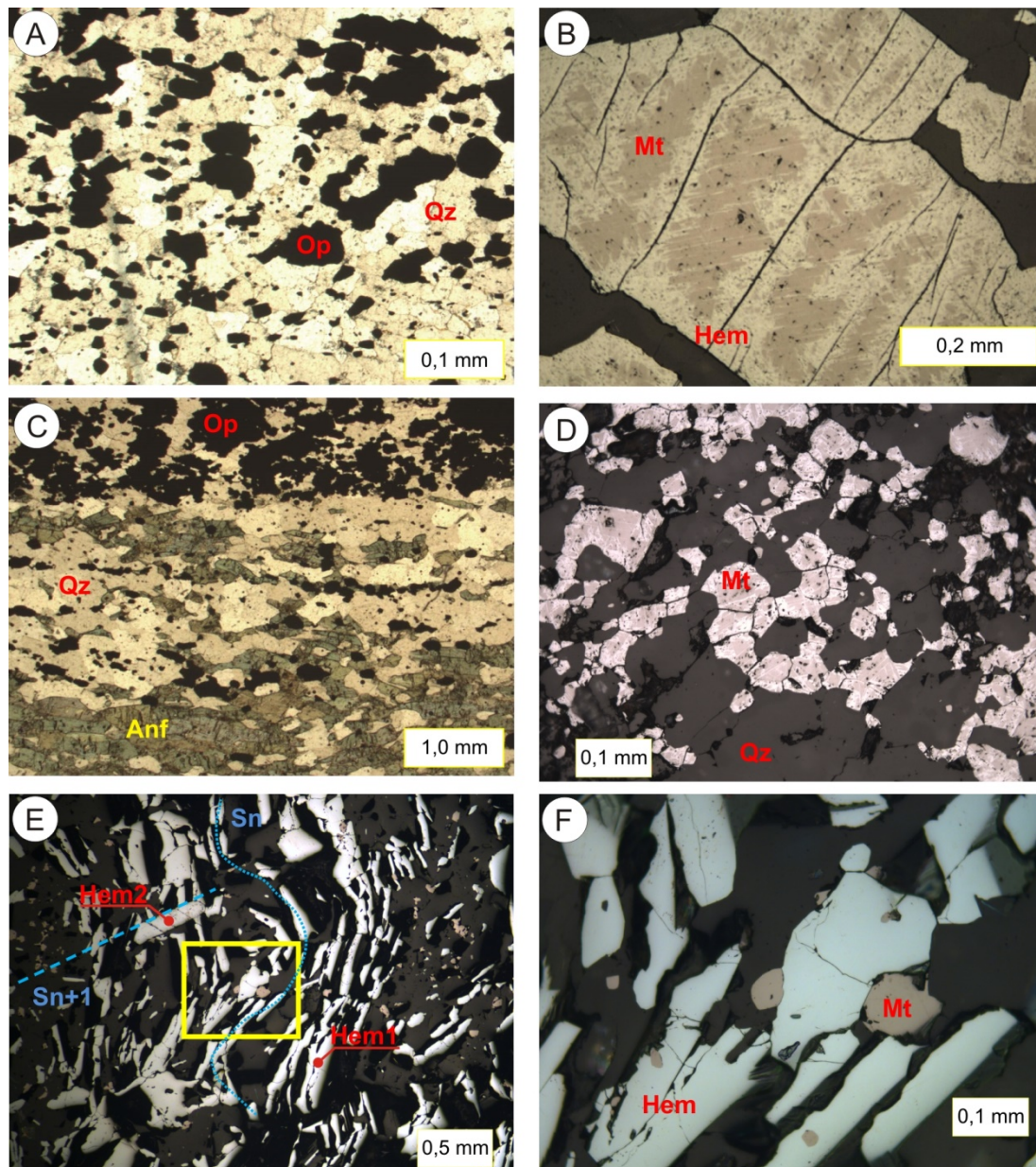


Figura 5 – (A) Fotomicrografia da amostra AR-R-217A em lâmina delgada e nicois paralelos mostrando a formação ferrífera granular com os minerais opacos disseminados (Op) em contato com cristais de quartzo (Qz). (B) Fotomicrografia de lâmina polida da amostra AR-R-217A de formação ferrífera granular com luz refletida de cristais de magnetita (Mt) bastante transformados para hematita (Hem) nas bordas e ao longo de fraturas. (C) Fotomicrografia de formação ferrífera bandada da amostra AR-R-096 em lâmina delgada e nicois paralelos alternando banda milimétrica rica em quartzo (Qz) de cor branca, anfibólios (Anf) de cor esverdeada e de minerais opacos (Op) de cor preta. As bandas são fortemente orientadas e alongadas na direção da foliação. (D) Fotomicrografia da amostra AR-R-192C de formação ferrífera bandada em seção polida com luz refletida composta essencialmente de quartzo (Qz) e magnetita (Mt) martitizada. (E) Fotomicrografia da amostra de formação ferrífera bandada HS-007A da mina de Saquinho em seção polida com luz refletida rica em hematita especular em duas gerações de cristalização. A primeira está alinhada segunda a superfície Sn que está dobrada. A segunda está alinhada segundo a superfície de plano axial Sn+1. O polígono amarelo é o detalhe apresentado na foto 5F. (F) Fotomicrografia da amostra de formação ferrífera bandada HS-007A em seção polida com luz refletida de cristais xenoblásticos de magnetita (Mt) associados ou inclusos em cristais de hematita especular (Hem).

4.1.3 ANÁLISES DE MEV E EDS

Foram obtidas imagens de MEV dos elétrons retroespalhados (BSE) dos três minerais essenciais que ocorrem nas rochas ferríferas da área de estudo. Os cristais de óxidos de ferro (magnetita ou hematita) apresentaram tons de cinza claro, os grãos de anfibólios com cor cinza de tom intermediário e os grãos de quartzo com tom de cinza escuro. Os resultados analíticos semiquantitativos do EDS estão apresentados na tabela 1 de composição química por elemento, com a disposição dos dados de concentração elementar em percentagem de peso de anfibólios, óxidos de ferro e anfibólios alterados com hidróxidos de ferro, todos agrupados em formações ferríferas granulares ou bandadas, correlatas respectivamente as rochas do Complexo Caicó e Formação Jucurutu. O EDS não diferencia os óxidos de ferro (magnetita e hematita).

Tabela 1: Resultado da química elementar semiquantitativa de cristais de anfibólios (Anf), anfibólios alterados com hidróxidos de ferro (Anf+Hfe) e óxidos de ferro (magnetita ou hematita – Mag/Hem) adquirido no EDS para rochas ferríferas granulares e bandadas da área de estudo. Dados em concentração normalizada em percentagem de peso.

Fm. Ferrifera	Amostra	Mineral	O	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total
Granular	AR-012	Anf 1	43,60	26,60		0,77	10,30		10,12	8,60			100
Granular	AR-012	Anf 2	44,01	26,30		0,72	9,37		8,98	10,63			100
Granular	AR-217A	Anf 1	39,92	23,69		0,49	25,80	1,76	7,53	0,65	0,14	0,03	100
Granular	AR-217A	Anf 2	41,11	16,60		0,17	15,37	3,23		19,49	0,06	3,97	100
Bandada	AR-192C	Anf 1	43,00	33,29		5,28	14,32		1,93	2,18			100
Bandada	AR-192C	Anf 2	42,19	24,87		2,25	16,49		5,55	8,63			100
Bandada	AR-213	Anf 1	42,17	24,15	0,44	0,90	17,07	0,85	6,34	7,82	0,16	0,10	100
Bandada	AR-213	Anf 2	40,31	19,59	2,89	0,41	15,15	2,88	3,04	12,34	0,26	3,13	100
Granular	AR-012	Anf+Hfe	36,00	19,38		1,56	40,25		1,90	0,92			100
Granular	AR-217A	Anf+Hfe	42,04	23,71		0,56	31,11	1,25		0,69	0,33	0,30	100
Granular	RF-035	Anf+Hfe	38,87	12,64		4,13	41,56	0,71	0,63	0,68	0,47	0,30	100
Granular	AR-012	Mag/Hem 1	28,25	1,18			70,24		0,28	0,05			100
Granular	AR-012	Mag/Hem 2	28,00	1,65		0,18	69,84		0,33				100
Granular	AR-217A	Mag/Hem	27,41	1,36		0,15	68,72	1,08		0,62	0,43	0,23	100
Granular	RF-035	Mag/Hem	25,71	1,82		0,09	70,90	1,01	0,09	0,13	0,24		100
Bandada	AR-192C	Mag/Hem 1	29,60	1,72		0,12	68,49			0,06			100
Bandada	AR-192C	Mag/Hem 2	30,15	2,56		0,18	66,24		0,56	0,31			100
Bandada	AR-213	Mag/Hem	32,23	1,68	0,01	0,17	64,70	0,87	0,26	0,07			100
Bandada	HS-007A	Mag/Hem	23,20	0,80	0,29	0,75	72,93	1,08	0,02	0,00	0,47	0,45	100

Para melhor interpretação dos dados de EDS foi realizada a estequiometria dos resultados, transformando os dados elementares em óxidos. Os anfibólios foram normalizados para 23 oxigênios e classificados de acordo com a ocupação dos seus sítios iônicos. Posteriormente foram classificados segundo quantidade de íons de sílica (Si), razão $Mg/(Fe^{+2}+Mg)$ e a soma dos íons de cálcio (Ca) e sódio (Na) na posição B da fórmula padrão dos anfibólios de acordo com Leake et al. (1997).

A tabela 2 apresenta a classificação recebida para os anfibólios que ainda foram corroboradas pelo banco de dados de espectrogramas e difratogramas de espécies minerais brasileiras em Sampaio (2016), além da composição química mineral constante no site Webmineral (<http://www.webmineral.com/>), que contém mais 4700 registros de espécimes minerais.

Através da química mineral não foi possível individualizar os tipos de formações ferríferas. Os minerais analisados nas formações ferríferas granulares e bandadas, ocorrem anfibólios cálcicos (actinolita, ferro-actinolita e ferro-edenita), com menor proporção de anfibólios ferromagnesianos e manganésíferos (grunerita). Apenas o cristal 1 da amostra AR-192C não se aplicou a classificação de Leake et al. (1997), porém sua composição química é muito próxima da ferroholmquistita, como consultado no Webmineral, mas não foi identificado lítio em sua composição, que é um elemento

presente nesse mineral. Porém, o EDS não faz a leitura deste elemento químico que apresenta um número atômico baixo, não detectável por esta técnica (Dedavid et al. 2007).

Tabela 2: Resultado da classificação dos anfibólios segundo Leake et al. (1997) obtidos a partir da análise química elementar semiquantitativa de cristais de anfibólios adquirida no EDS para rochas ferríferas granulares e bandadas da área de estudo.

Fm. Ferrífera	Amostra	Mineral	Classificação de anfibólios de Leake et al. (1997)
Granular	AR-012	Anfibolio - Cristal 1	Actinolita
Granular	AR-012	Anfibolio - Cristal 2	Actinolita
Granular	AR-217A	Anfibolio - Cristal 1	grunerita manganésifera
Granular	AR-217A	Anfibolio - Cristal 2	ferro-edenita potássica
Bandada	AR-192C	Anfibolio - Cristal 1	Ferroholmquistite (?)
Bandada	AR-192C	Anfibolio - Cristal 2	ferro-actinolita
Bandada	AR-213	Anfibolio - Cristal 1	ferro-actinolita
Bandada	AR-213	Anfibolio - Cristal 2	ferro-edenita manganésifera-titanífera-potássica

Os anfibólios alterados com hidróxido de ferro (tabela 1) não foram classificados, mas percebe-se claramente o enriquecimento de ferro provocado por alterações minerais, com o crescimento de hidróxido de ferro, em comparação com a química mineral apresentada pelos anfibólios não alterados.

Os óxidos de ferro apresentam composição similar com magnetitas em ambos os tipos de formações ferríferas (granulares e bandadas) com baixo percentual de sílica e traços de alumínio, magnésio, cálcio e muito pouco manganês, titânio, sódio e potássio. É provável que a origem do Al, Mg, Ca e K seja de inclusões minerais ou fissuras no interior de magnetitas.

4.1.4 ASSOCIAÇÕES MINERAIS E PARAGÊNESE

Na região das áreas de estudo, considerando a mineralogia, textura, estrutura e composição química mineral já discutida em itens anteriores, as rochas ferríferas apresentam composição relativamente simples, dominando principalmente quartzo, magnetita, hematita e anfibólios. Nas rochas ferríferas granulares normalmente é menor o percentual de anfibólios em comparação com as rochas ferríferas bandadas, que apresentam um percentual mais variado. Dentre as características mineralógicas apresentadas, percebe-se que os dois grupos de rochas ferríferas podem ainda ser divididas em mais duas fácies com relação à mineralogia (James, 1954): formação ferrífera granular fácies óxido, formação ferrífera granular fácies óxido-silicato, formação ferrífera bandada fácies óxido e formação ferrífera bandada fácies óxido-silicato. A terminologia óxido-silicato não é contemplada na classificação de James (1954), mas já foi adotada em alguns trabalhos (Fernandes et al. 2003, 2004) quando a rocha apresenta características mineralógicas dessas duas fácies de rocha ferrífera. Raposo (1996) faz referência a uma ocorrência de formação ferrífera metamórfica fácies óxido com uma forte componente silicática para um tipo litológico com grunerita como um dos constituintes essenciais da rocha. Essa característica também é observada nas rochas ferríferas granulares e bandadas estudadas neste trabalho.

As associações minerais observadas são comuns aos dois grupos de rochas estudados. O crescimento de grãos de quartzo ocorre associado a cristais de magnetita e anfibólios, mesmo quando o bandamento milimétrico típico da formação ferrífera bandada mostra a concentração de níveis mais ricos em quartzo, minerais opacos (magnetita e hematita) e anfibólios intercalados. As relações de inclusões minerais são variadas, pois esses três minerais (quartzo, opacos e anfibólios) ocorrem como inclusões uns dos outros, indicando um crescimento contínuo durante o metamorfismo.

Considerando a natureza isoquímica do comportamento das formações ferríferas durante o metamorfismo, com perda apenas de voláteis (Klein, 1983) em reações de desidratação e decarbonatação (Klein 2005), as rochas ferríferas da região central do Rio Grande do Norte apresentam associações minerais de rochas ferríferas de grau metamórfico médio. Nesse caso em

temperaturas que variam de 450 até 550°C e pressões que variam de 2 até 5 kbar (James, 1955; Haase, 1982a).

Para as rochas ferríferas o quartzo, a magnetita e a hematita apenas se recristalizam e aumentam os tamanhos dos cristais com as condições crescentes de temperatura e pressão (James, 1954; Klein, 1973). Raposo (1996) afirma que as formações ferríferas não têm o mesmo comportamento que as rochas argilosas quando submetidas a elevações de temperatura e pressão, sobretudo nas faixas de temperaturas mais baixas. Alguns tipos, como os da fácies óxido, subfácies magnetita, constituídas essencialmente ou inteiramente por quartzo e magnetita, não sofrem nenhuma transformação mineralógica com o metamorfismo progressivo. Ocorre apenas um aumento do tamanho dos grãos de quartzo e magnetita.

No caso dos anfibólios, a ocorrência de minerais membros das séries cummingtonita-grunerita e tremolita-actinolita ocorre em associação, tanto nas formações ferríferas bandadas como nas formações ferríferas granulares da região central da Faixa Seridó. Esse tipo de associação é comum em rochas ferríferas quando as rochas pretéritas apresentam carbonato. Haase (1982b) através de estudos analíticos afirma que essas assembleias de coexistência de actinolita e grunerita ocorrem em médio grau metamórfico (400-500°C) e na presença de fluidos ricos em água e CO₂.

Grande parte da hematita nas rochas estudadas ocorre como produto de martitização. A presença escassa de hidróxidos de ferro, como goethita, por exemplo, denota a ideia de que as alterações intempéricas não foram muito atuantes na região. Sendo assim, essas hematitas das rochas ferríferas da região central do Rio Grande do Norte, especificamente produto de martitização, podem ser relatadas não como evidência de lixiviação. Klein (1983) sugere que essa substituição ocorre durante metamorfismo regional e que não está relacionada com posterior oxidação supergênica de minérios de ferro. Halos de hidróxidos de ferro ocorrem em pouca proporção, envolvendo os grãos minerais de quartzo, opacos (magnetita e hematita) e anfibólios.

Após essas discussões sobre a cristalização mineral em rochas ferríferas desde diagênese até condições metamórficas de médio grau (fácies xisto verde e anfibólito), considerando as espécies minerais, abundâncias e as relações entre eles, em condições de metamorfismo e pós-metamorfismo (hidrotermalismo ou intemperismo), foi possível sugerir uma paragênese mineral (Tabela 3) para os dois grupos de rochas ferríferas da área de estudo.

Tabela 3: Sequência paragenética proposta para os minerais essenciais das rochas ferríferas das áreas de estudo. (*) Os eventos de pós-metamorfismo podem incluir hidrotermalismo ou intemperismo.

Mineralogia	Metamorfismo	Pós-metamorfismo*
Formação ferrífera granular		
Quartzo	-----	-----
Magnetita	-----	
Hematita	-----	-----
Cummingtonita-grunerita	-----	
Tremolita-actinolita	-----	
Hidróxidos de ferro		-----
Formação ferrífera bandada		
Quartzo	-----	-----
Magnetita 1	-----	
Magnetita 2	-----	
Hematita 1	-----	-----
Hematita 2	-----	-----
Cummingtonita-grunerita 1	-----	
Cummingtonita-grunerita 2	-----	
Tremolita-actinolita 1	-----	
Tremolita-actinolita 2	-----	
Hidróxidos de ferro		-----

Em ambos os tipos de rocha (formação ferrífera granular e bandada) existe estreita relação no crescimento simultâneo de quartzo, magnetita e anfibólios (membros da série cummingtonita-

grunerita e tremolita-actinolita). Hematita como produto de martitização provavelmente foi originada durante a evolução do metamorfismo à medida que água foi liberada nas reações metamórficas. No caso das formações ferríferas bandadas foi possível observar uma segunda geração de magnetita, hematita e anfibólios da série cummingtonita-grunerita e tremolita-actinolita cristalizados paralelos aos planos axiais de dobras geradas durante o metamorfismo progressivo que atingiu as áreas de estudo.

4.2 LITOQUÍMICA DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS

Para análise dos dados químicos das rochas ferríferas nas áreas de estudo (polígonos nordeste e sudoeste) foi utilizado um grupo de 17 amostras e os resultados estão apresentados na Tabela 4. A amostra RF-089A da mina de Saquinho é de uma porção de minério de ferro maciço (>67% de Fe) do pacote de formação ferrífera bandada. Através da litoquímica é possível observar o comportamento elementar das formações ferríferas granulares e bandadas, encaixadas nas rochas do Complexo Caicó e Formação Jucurutu, respectivamente, buscando suas similaridades ou diferenças. Nesse sentido, os gráficos apresentados serão divididos em formações ferríferas granulares e bandadas.

4.2.1 LITOQUÍMICA DOS ELEMENTOS MAIORES

O conjunto de dados (Tabela 4) dos elementos maiores (óxidos) está representado no gráfico de elementos maiores em escala logarítmica (Figura 6). Também foi realizada a comparação da média dos óxidos de rochas ferríferas das áreas de estudo, com a média dos tipos Algoma, Lago Superior e Rapitan do Canadá.

Na figura 6 os dados seguem a tendência das formações ferríferas do Canadá, com a composição maior que 90% de $Fe_2O_{3T} + SiO_2$. Al_2O_3 , MgO e CaO ocorrem entre valores muito baixos até próximo de 3%. Os óxidos TiO_2 , MnO, Na_2O , K_2O e P_2O_5 ocorrem com um percentual menor que 1%. Somente a amostra AR-021 (Figura 6B) apresentou teor de K_2O (1,6%) um pouco maior que os tipos genéticos do Canadá e a amostra RF-089A (Figura 6B), de minério de ferro maciço, tem baixa SiO_2 e muito alto Fe_2O_{3T} .

Tabela 4 – Análises químicas dos elementos maiores, elementos traços e terras raras das rochas ferríferas granulares e bandadas, encaixadas respectivamente no Complexo Caicó e nas rochas da Formação Jucurutu das áreas de estudo.

Amostra	EL-16A	ML-542B	RF-032	RF-035	AR-012	AR-217	AR-220	RF-086	RF-089B	RF-102	RF-105	AR-021	AR-096	AR-192A	AR-192C	AR-213	RF-089A
%	Rochas ferríferas granulares							Rochas ferríferas bandadas									
SiO_2	39,50	33,47	39,13	41,07	43,74	44,52	44,08	45,24	49,35	50,12	47,78	42,26	41,45	50,58	49,45	45,34	1,20
Al_2O_3	0,63	0,43	0,52	0,63	0,51	0,33	0,61	0,21	0,18	0,10	0,14	2,42	0,97	0,66	0,81	0,50	0,49
Fe_2O_{3T}	56,93	64,4	59,03	57,29	53,22	53,98	54,29	53,6	48,11	46,27	51,38	52,18	56,17	48,79	46,95	50,55	96,72
MnO	0,06	0,11	0,05	0,08	0,14	0,16	0,13	0,05	0,04	0,16	0,05	0,02	0,12	0,07	0,25	0,07	0,79
MgO	1,09	1,26	1,05	0,25	0,99	0,32	2,30	0,12	0,09	1,05	0,04	<0,01	1,46	0,10	1,59	1,79	0,19
CaO	0,68	1,10	0,94	0,33	1,02	<0,01	1,73	0,08	0,03	0,77	0,03	0,29	1,72	0,14	1,58	1,50	0,21
Na_2O	0,10	0,01	0,07	0,02	0,10	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,20	0,06	<0,01	0,06	0,05	0,01
K_2O	0,26	0,02	0,05	0,03	0,04	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	1,62	0,06	0,06	0,13	0,01	<0,01
P_2O_5	0,13	0,14	0,26	0,26	0,18	<0,01	0,07	0,13	0,07	0,11	0,13	0,36	0,06	0,07	0,02	0,09	0,22
TiO_2	0,02	0,10	0,02	<0,01	0,08	0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,32	0,06	0,04	0,04	0,02	0,01
Cr_2O_3	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,01	<0,01	0,03	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,013
LOI	0,60	-1,10	-1,20	0,00	<0,01	<0,01	<0,01	0,50	2,10	1,30	0,40	<0,01	0,45	0,60	<0,01	0,35	0,10
TOTAL	99,97	99,94	99,91	99,96	100,02	99,03	102,62	99,98	99,96	99,92	99,95	99,02	102,58	101,13	100,67	100,26	99,97

Tabela 4 - Continuação.

Amostra	EL-	ML-	RF-	RF-	AR-	AR-	AR-	RF-	RF-	RF-	RF-	AR-	AR-	AR-	AR-	AR-	RF-
---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

	16A	542B	032	035	012	217	220	086	089B	102	105	021	096	192A	192C	213	089A
ppm	Rochas ferríferas granulares							Rochas ferríferas bandadas									
U	0,30	0,20	0,20	0,10	0,62	0,27	0,42	0,20	0,40	0,40	0,10	5,36	0,25	0,15	0,14	0,18	0,90
Y	10,30	5,10	7,70	15,10	9,11	5,09	7,69	3,40	2,80	3,10	1,60	4,88	10,02	3,71	6,74	3,76	10,60
Zr	5,70	5,10	4,90	2,80	14,90	3,50	7,20	3,30	2,00	0,80	0,90	37,20	12,10	13,90	15,00	3,20	7,60
Cu	2,80	11,40	2,00	1,60	81,90	11,30	32,20	1,60	0,50	20,50	0,70	3,10	13,80	9,40	4,90	72,60	0,40
Mo	0,10	0,40	<0,10	<0,10	1,13	1,10	0,91	0,10	0,80	5,40	<0,10	0,27	0,59	1,55	0,42	0,76	0,80
Pb	1,60	0,40	0,50	1,50	1,20	1,20	1,10	0,60	1,00	1,50	1,80	5,20	1,80	4,10	17,70	0,50	1,30
Zn	18,00	7,00	18,00	22,00	39,00	6,00	50,00	7,00	4,00	95,00	21,00	3,00	1,00	5,00	10,00	7,00	2,00
Nb	0,90	1,20	0,90	0,20	3,16	0,67	3,06	<0,10	<0,10	1,30	<0,10	9,22	0,80	1,33	0,72	1,05	1,00
Ni	3,60	7,10	4,10	2,60	6,30	10,20	3,70	6,60	7,40	7,40	4,40	17,50	20,30	8,30	10,10	9,90	8,20
Rb	6,40	1,30	2,20	2,10	0,40	0,50	0,30	0,50	<0,10	0,40	<0,10	145,40	3,10	4,50	8,60	0,30	<0,10
Sr	28,00	5,90	20,70	17,80	23,70	<0,50	3,00	6,20	2,00	8,70	3,00	217,80	33,80	1,70	12,10	7,40	7,20
Th	0,30	0,20	0,30	<0,20	3,00	1,10	0,80	<0,20	<0,20	<0,20	0,30	13,40	0,90	0,80	0,80	1,80	0,40
Ba	146,00	31,00	29,00	45,00	195,00	31,00	65,00	27,00	4,00	54,00	3,00	5430,00	57,00	42,00	39,00	122,00	87,00
Co	1,50	5,80	1,90	0,40	12,70	2,20	11,50	0,80	1,40	2,30	0,40	5,40	3,60	1,70	2,30	5,10	12,30
Ga	1,50	3,80	1,30	0,90	8,70	1,10	7,90	<0,50	<0,50	1,10	<0,50	13,30	2,00	1,00	1,10	3,10	1,00
Hf	0,10	<0,10	0,20	<0,10	0,38	0,23	0,23	<0,10	<0,10	0,10	<0,10	1,41	0,21	0,25	0,29	0,35	<0,10
La	12,90	5,30	13,30	12,40	23,70	8,60	19,80	5,70	6,40	1,40	0,80	24,30	17,90	13,30	19,00	9,10	15,90
Ce	20,40	9,10	15,40	15,50	27,30	6,40	9,20	6,30	6,10	1,90	1,20	47,00	13,10	4,80	6,70	6,60	57,30
Pr	2,80	1,16	2,50	2,66	3,01	0,59	1,77	1,05	1,25	0,24	0,18	5,12	2,02	0,91	1,52	0,83	1,59
Nd	11,00	4,80	9,10	8,90	11,60	2,40	7,10	3,80	4,60	1,00	0,70	17,20	7,20	3,50	5,70	3,20	5,00
Sm	1,64	0,81	1,40	1,78	1,80	0,30	1,20	0,59	0,61	0,19	0,15	2,50	1,30	0,60	1,00	0,60	0,95
Eu	0,42	0,19	0,36	0,53	0,32	0,08	0,22	0,18	0,18	0,08	0,08	0,42	0,37	0,11	0,26	0,19	0,33
Gd	1,56	0,81	1,27	1,94	1,69	0,46	1,17	0,49	0,46	0,23	0,19	2,34	1,33	0,44	0,99	0,63	1,06
Tb	0,22	0,13	0,20	0,31	0,17	<0,05	0,15	0,09	0,08	0,04	0,04	0,37	0,17	<0,05	0,10	0,11	0,21
Dy	1,40	0,71	1,01	1,85	1,24	0,46	1,01	0,46	0,40	0,23	0,18	1,16	1,44	0,43	0,86	0,58	0,89
Ho	0,26	0,14	0,23	0,41	0,21	0,09	0,21	0,09	0,07	0,06	0,05	0,28	0,23	<0,05	0,11	0,15	0,24
Er	0,82	0,49	0,63	1,23	0,68	0,36	0,61	0,27	0,24	0,18	0,09	0,58	0,90	0,21	0,49	0,33	0,78
Tm	0,14	0,07	0,11	0,19	<0,05	<0,05	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,17	0,08	<0,05	<0,05	0,07	0,11
Yb	0,70	0,44	0,57	1,08	0,60	0,30	0,60	0,22	0,21	0,20	0,15	0,50	0,70	0,20	0,30	0,30	0,72
Lu	0,12	0,07	0,10	0,16	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,16	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	0,12
Σ ETR	54,38	24,22	46,18	48,94	72,32	20,04	43,1	19,34	20,68	5,82	3,87	102,1	46,74	24,5	37,03	22,75	85,20
Σ ETRY	64,68	29,32	53,88	64,04	81,43	25,13	50,79	22,74	23,48	8,92	5,47	106,98	56,76	28,21	43,77	26,51	95,80
Ce/Ce* (PAAS)	0,78	0,85	0,61	0,62	0,71	0,55	0,32	0,59	0,50	0,75	0,73	0,97	0,47	0,27	0,25	0,50	2,41
Ce/Ce* (NASC)	-0,13	-0,10	-0,23	-0,21	-0,20	-0,35	-0,57	-0,25	-0,33	-0,17	-0,15	-0,02	-0,38	-0,66	-0,68	-0,37	0,33
Eu /Eu* (PAAS)	1,24	1,10	1,27	1,34	0,86	1,01	0,87	1,58	1,60	1,80	2,23	0,82	1,33	1,01	1,23	1,46	1,55
Pr/Pr* (PAAS)	1,09	1,03	1,23	1,32	1,00	0,88	1,23	1,24	1,33	1,02	1,14	1,06	1,21	1,26	1,36	1,06	0,42
Pr/Yb (PAAS)	1,28	0,84	1,40	0,79	1,60	0,63	0,94	1,52	1,90	0,38	0,38	3,27	0,92	1,45	1,62	0,88	0,71
Y/Ho	39,62	36,43	33,48	36,83	43,38	56,56	36,62	37,78	40,00	51,67	32,00	17,43	43,57	74,20	61,27	25,07	44,17
Sm/Yb (PAAS)	1,19	0,94	1,25	0,84	1,52	0,51	1,02	1,36	1,48	0,48	0,51	2,54	0,94	1,52	1,69	1,02	0,67
Eu/Sm (PAAS)	1,32	1,21	1,32	1,53	0,91	1,37	0,94	1,57	1,52	2,16	2,74	0,86	1,46	0,94	1,34	1,63	1,79

Para ambos os grupos de rochas ferríferas (granulares e bandadas) das áreas de estudo, a distribuição dos óxidos encontra-se no limiar entre os tipos Algoma e Rapitan, principalmente nas formações ferríferas granulares. No geral, a litoquímica de elementos maiores para ocorrências de rochas ferríferas na Faixa Seridó são semelhantes aos padrões dos tipos genéticos do Canadá. Porém os teores de SiO₂ são menores e o de Fe₂O_{3T} são um pouco maiores, mas a diferença ainda é pequena e desconsiderável. A soma desses dois óxidos são maiores que aqueles encontrados no Canadá. Os teores de TiO₂ e K₂O são muito próximos, com poucas exceções. Al₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O e P₂O₅ apresentam teores normalmente menores do que aqueles observados nas rochas

do Canadá. Apenas os teores de MnO são mais variados, ou para mais ou para menos da média dos tipos Algoma, Lago Superior e Rapitan.

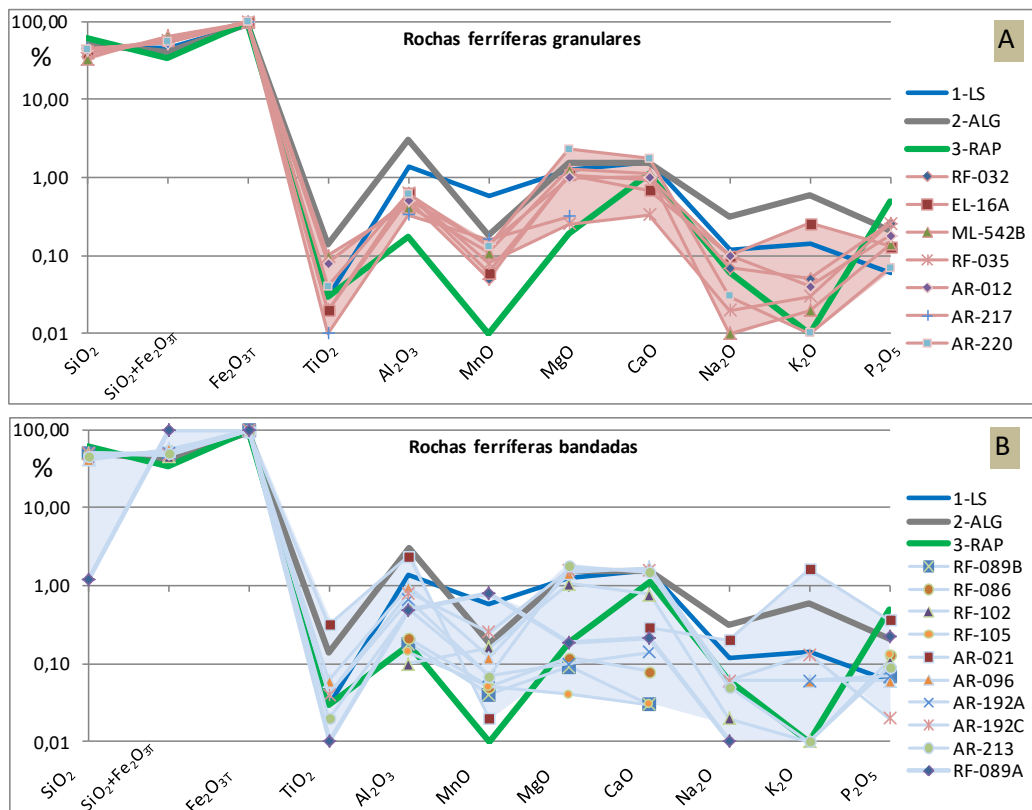


Figura 6 – Distribuição dos elementos químicos maiores das rochas ferríferas granulares (A) e bandadas (B) (linhas rosada e azul clara, respectivamente) localizadas nas áreas de estudo dos polígonos nordeste e sudoeste, em comparação com as médias dos tipos Algoma, Lago Superior e Rapitan do Canadá (linhas cinza, azul e verde, respectivamente). 1-LS: Fácies óxido - Tipo Lago Superior (Gross e McLeod 1980); 2-ALG: Fácies óxido - tipo Algoma (Gross e McLeod 1980); 3-RAP: Formações ferríferas bandadas do Canadá - Tipo Rapitan (Klein e Beukes 1993). As áreas em rosa e azul correspondem ao envelope com os resultados das análises químicas apresentadas neste trabalho.

Dentre as possíveis correlações entre os óxidos apenas a de SiO_2 versus Fe_2O_{3T} apresentou uma forte correlação, que no caso é negativa ou antitética ($R = -0,99$) (Figura 7), resultado corroborado pela caracterização petrográfica predominantemente bimodal nas rochas ferríferas da Faixa Seridó, representados por quartzo e minerais de ferro, principalmente óxidos e hidróxidos de ferro.

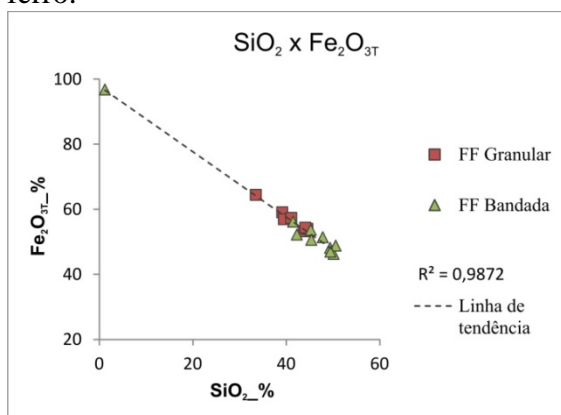


Figura 7 – Correlação SiO_2 versus Fe_2O_{3T} para o total de 17 amostras de ocorrências de rochas ferríferas granulares e bandadas na Faixa Seridó, encaixadas nas rochas do Complexo Caicó e

Formação Jucurutu, na região central do Estado do Rio Grande do Norte. A amostra na extremidade esquerda do gráfico é de minério de ferro maciço com mais de 96% de Fe_2O_{3T} . O valor de R2 corresponde ao coeficiente de determinação que é muito próximo de 1, indicando o ajustamento estatístico linear entre as amostras.

4.2.2 LITOQUÍMICA DOS ELEMENTOS TRAÇOS

As rochas ferríferas das áreas de estudo mostram valores baixos de elementos traços. Os valores médios são de aproximadamente 25 ppm e os máximos não ultrapassam 100 ppm, com exceção do Rb, Sr e Ba que extrapolam esse valor em algumas amostras. Dezesesseis elementos (V, Ag, As, Au, Bi, Cd, Hg, Sb, Tl, Sc, Se, Sn, Ta, Be, Cs e W) ficaram abaixo dos limites de determinação ou mostram valores mensuráveis em tão poucas amostras que não estão representados na tabela 4 e no gráfico multi-elementar (Figura 8). Seis elementos (Mo, Nb, Rb, Th, Ga e Hf) tiveram a maior parte das amostras mensuráveis, porém algumas ficaram abaixo do limite de detecção. Dez elementos (U, Y, Zr, Cu, Pb, Zn, Ni, Sr, Ba e Co) foram detectados em todas as amostras.

Com os gráficos bivariantes de óxidos versus elementos traços não foi possível distinguir agrupamentos distintos de rochas ferríferas granulares e bandadas. Porém, outra maneira de analisar as concentrações de elementos traços nas amostras de rochas ferríferas nas áreas de estudo é apresentando os teores em ppm normalizados ao Pos-Archean Australian Shale (PAAS) (Figura 8), obtidos por McLennan (1989). Esse estudo é focado sobre a fonte do ferro e a análise da correlação dos elementos traços com o reflexo da contribuição de fluidos hidrotermais e detríticos e sua relação com a mistura de sedimentos na água do mar (Gross, 1983; Bekker et al., 2010).

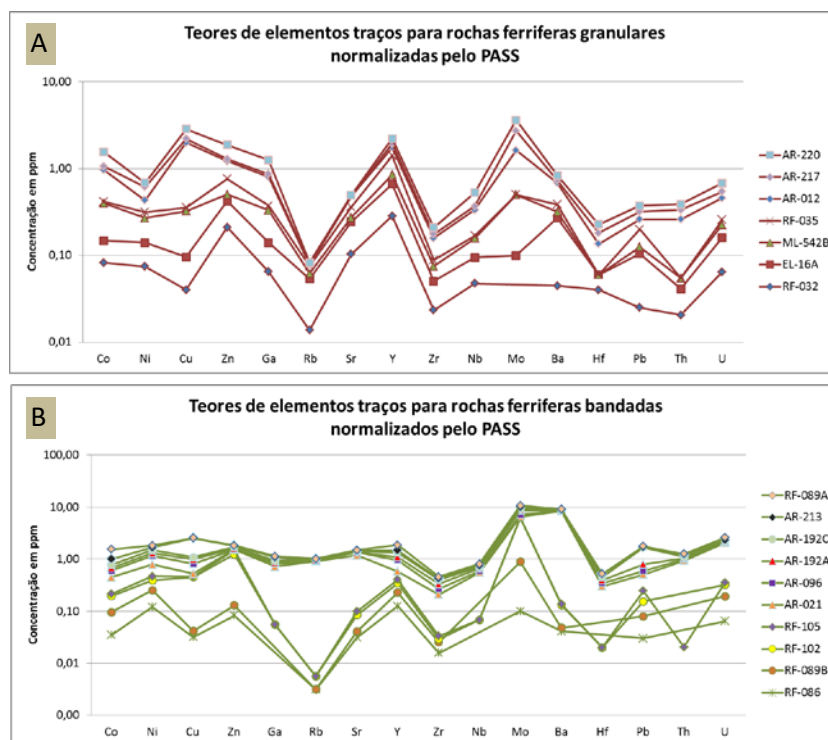


Figura 8 – Gráfico multielementar da distribuição de teores de elementos traços normalizados ao PAAS para as formações ferríferas granulares (A) e bandadas (B) das áreas de estudo. Escala vertical mostra valores de concentração (ppm) em escala logarítmica. As maiores concentrações de elementos traços litófilos (Rb, Sr, Y, Zr) estão relacionadas ao grupo de formações ferríferas (FF) depositadas em sítios distais, enquanto que os elementos Co, Ni e Cu têm suas maiores concentrações relacionados ao grupo de FF depositadas em sítios proximais às fontes hidrotermais (Gross, 1983; Bekker et al., 2010).

Nos gráficos multielementares (Figura 8) percebem-se algumas particularidades entre os dois grupos de rochas e as concentrações de elementos traços, permitindo uma separação entre elas. O gráfico para as rochas ferríferas granulares é mais consistente (Figura 8A). São claras as anomalias positivas de Zn, Y, Mo e Pb e negativas bastante pronunciadas de Rb e Zr, todas em relação ao PAAS. Para as rochas ferríferas bandadas existem dois conjuntos de amostras distintas (Figura 8B). As amostras RF-086, RF-089B, RF-102 e RF-105 apresentam as mesmas anomalias positivas e negativas das rochas ferríferas granulares, enquanto que as restantes apenas positivas de Mo e Pb, evidenciando também um agrupamento característico que indica homogeneidade desse segundo conjunto de amostras. Porém para ambos conjuntos de formações ferríferas bandadas, as curvas apresentam uma anomalia positiva discreta de Ni em relação ao PAAS, diferentemente das formações ferríferas granulares.

4.2.3 LITOQUÍMICA DOS ELEMENTOS TERRAS RARAS

Os teores dos elementos terras raras nas rochas ferríferas das áreas de estudo (polígonos nordeste e sudoeste) são baixos (teor máximo de 57 ppm e médio de 3 ppm), corroborando com aqueles observados nas BIFs fácies óxido no mundo (Appel, 1987; Davy, 1983). Appel (1987) diz que a distribuição dos ETR parece estar relacionada com o tipo de fácies, sendo o óxido o que apresenta os valores mais baixos.

Neste trabalho a análise do comportamento dos ETR nas rochas ferríferas foi realizada normalizando os resultados pelo *Pos-Archean Australian Shale* (PAAS). A anomalia de Eu* foi definida quantitativamente segundo a média geométrica recomendada por McLennan (1989) e a anomalia verdadeira de Ce*, além da anomalia de Pr* foi definida conforme as equações observadas em Planavsky et al. (2010).

O grau de enriquecimento de ETRL em relação ao ETRP é apresentado na razão normalizada ao PAAS de Sm e Yb: $(Sm/Yb)_N$. Os valores para as rochas ferríferas granulares variam de 0,51 até 1,52, enquanto para as rochas ferríferas bandadas de 0,48 até 1,69, com exceção da amostra AR-021 com valor de 2,54. São dados similares aos dois grupos de rocha, que indicam tendências lineares (próximos de 1), exceto a amostra AR-021 que apresenta enriquecimento mais pronunciado de ETRL sobre ETRP.

As rochas ferríferas das áreas de estudo apresentam razão variada de Y/Ho entre 17 e 74. A razão Y/Ho típica da água do mar fica entre 60 e 90, enquanto os valores para águas continentais se situam mais próximos dos valores crustais (26-27) (Planavsky et al., 2010). Levando isso em consideração quase todas as amostras apresentam alguma influência de águas continentais. Apenas as amostras RF-102, AR-217, AR-192A e AR-192C (ambas do mesmo afloramento) apresentam mais influência de águas marinhas. A amostra AR-217 é de rocha ferrífera granular, enquanto as outras três são de rochas ferríferas bandadas.

Ce/Ce*

Anomalia de Ce na água do mar é sensível à variação das condições redox e tem sido utilizada para averiguar condições subóxia ou anóxica da coluna de água. Há duas interpretações das causas de variação de anomalia de Ce na água do mar. Segundo Wright et al. (1987) e Liu et al. (1988) a anomalia de Ce é um traçador químico para condições redox paleoceanica. Os valores de $Ce < -0,1$ resultam do empobrecimento de Cério ou fracionamento para óxidos metálicos, indicando condições oxidantes. Valores de $Ce > -0,1$ ao contrário, refletiria condições anóxicas na água do mar. Para calcular a anomalia de Ce_N conforme discutido acima, utilizou-se o normalizador *North American Shale Composite Standard* (NASC) de Haskin et al. (1968) e a fórmula apresentada em Wright et al. (1987). Os valores resultantes de Ce/Ce^* normalizados pelo NASC seguem na tabela 4 e os dados estão melhor representados no gráfico $Ce/Ce^* \times Nd$ (Figura 9). Os valores de Ce/Ce^* quando plotados contra Nd claramente situam-se abaixo de $-0,1$ indicando um ambiente oxidante,

exceto para as amostras AR-021 e RF-089A, ambas de formação ferrífera bandada depositadas em condições anóxicas.

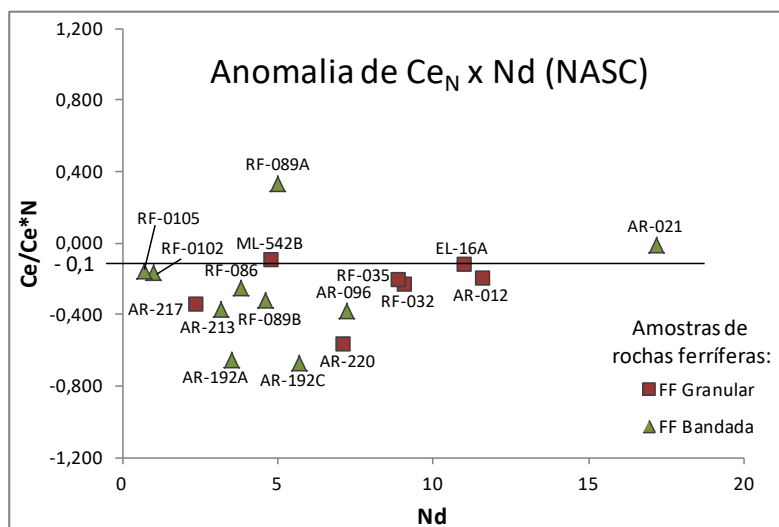


Figura 9 – Anomalia de Ce/Ce* normalizado pelo NASC (*North American Shale Composite*) versus Nd das ocorrências de rochas ferríferas (FF) granulares e bandadas das áreas de estudo, na região central do Rio Grande do Norte.

A abundância na concentração de La pode mascarar as anomalias de Ce. Para testar se as anomalias de Ce/Ce* são reais, utilizou-se o diagrama discriminatório de Bau e Dulsky (1996), plotando Ce/Ce* versus Pr/Pr* (Figura 10). Segundo Bau e Dulsky (1996) a combinação de $(Ce/Ce^*)_{SN} < 1$ e $(Pr/Pr^*)_{SN} \sim 1$ indicam anomalias positivas de La, conforme é possível observar às amostras que se encontram nos campos IIa e IV do gráfico Ce_N x Pr_N (Figura 10). Apenas duas amostras encontram-se fora desses campos apresentadas no gráfico da figura 10: AR-021 e RF-089A. A amostra AR-021 encontra-se próxima ao campo I, enquanto a amostra RF-089A extrapola os limites do gráfico.

Conforme indicado na figura 10 a maioria das amostras marcam verdadeiras anomalias negativas em cério, sendo que algumas amostras registram tendências para anomalias positivas em La, mascarando as anomalias negativas de Ce. Isto implica que os grupos de rochas estudados definem representantes extremos de condições da bacia, onde zonas de superposição evidenciam ambientes intermediários e/ou transicionais entre os sítios deposicionais.

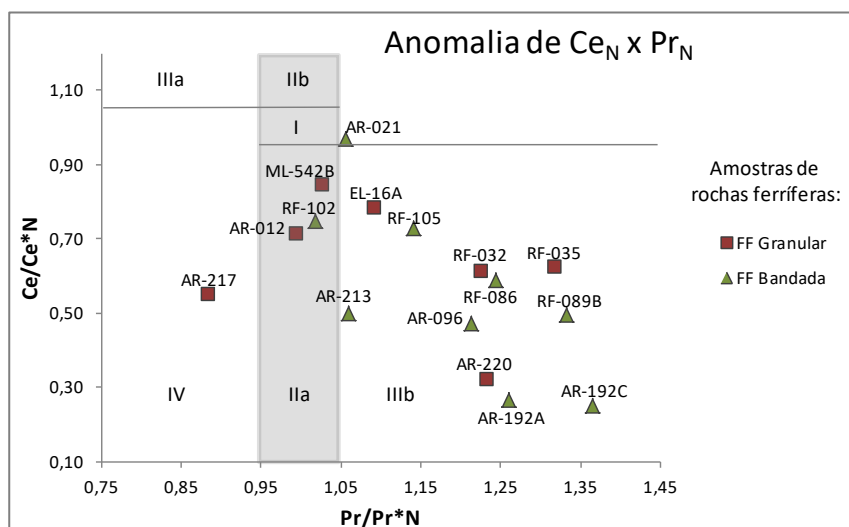


Figura 10 – Gráfico da anomalia de Ce/Ce* versus Pr/Pr* normalizados pelo PAAS (Bau e Dulski, 1996) para as rochas ferríferas (FF) granulares e bandadas das áreas de estudo, na região central do

Rio Grande do Norte. I - sem anomalia; IIa - anomalia positiva de La causa aparente anomalia negativa de Ce; IIb - anomalia negativa de La causa aparente anomalia positiva de Ce; IIIa - real anomalia positiva de Ce; IIIb - real anomalia negativa de Ce; IV - anomalia positiva de La disfarçada de anomalia positiva de Ce.

Eu/Eu*

Segundo Klein (2005) diferenças na amplitude de anomalias de Eu resultam de um declínio da contribuição hidrotermal nas bacias oceânicas do Arqueano ao Neoproterozoico; Bau e Möller (1993) atribuem essa redução à queda de temperatura das soluções hidrotermais.

Nas áreas de estudo quase todas as amostras normalizadas em relação ao PAAS mostram anomalias positivas de európio ($Eu/Eu^* > 1$, Tabela 4), típicas de soluções hidrotermais oceânicas originadas em sistemas convectivos submarinos. Em alguns locais a incipiente ou ausente anomalia de Eu pode ser decorrente das condições de baixa temperatura do fluido mineralizador, neste caso fluidos de alta temperatura são escassos ou ausentes. Apenas as amostras AR-012 e AR-220 de formação ferrífera granular e AR-021 de formação ferrífera bandada apresentam valores menores que 1, porém bem próximas, representando assim uma suave anomalia negativa de Eu.

GRÁFICOS DE CONCENTRAÇÃO DE ETR'S

Na figura 11 observam-se os gráficos de padrão ETR normalizado ao PAAS (*Post-Arquean Australian Shale*) em escala logarítmica, para as amostras de rochas ferríferas granulares (Figura 11A) e bandadas (Figura 11B), localizadas nas áreas de estudo nordeste e sudoeste na Faixa Seridó.

As amostras de rochas ferríferas granulares (Figura 11A) apresentam anomalia negativa de cério ($Ce/Ce^* = 0,32-0,85$) e anomalias positiva e negativa de európio ($Eu/Eu^* = 0,86-1,34$) muito pouco pronunciada. O comportamento dos ETR é aproximadamente planar, com leve fracionamento dos ETRP, mais pronunciado nas amostras AR-217, RF-035 e ML-542B.

As amostras de rochas ferríferas bandadas (Figura 11B) apresentam anomalia negativa de cério (0,25-0,75) pronunciada, exceto para as amostras AR-021 ($Ce/Ce^* = 0,97$, anomalia negativa pouco pronunciada) e RF-089A ($Ce/Ce^* = 2,41$, anomalia positiva). O európio apresenta-se com anomalias positivas ($Eu/Eu^* = 1,01-2,23$), exceto para amostra AR-021 ($Eu/Eu^* = 0,82$, anomalia negativa pouco pronunciada). O comportamento dos ETR é aproximadamente planar, com leve fracionamento dos ETRP, mais pronunciado nas amostras RF-102 e RF-105. Os ETRL apresentam fracionamento em relação aos ETRP na amostra AR-021, diferenciando do comportamento geral das amostras do grupo.

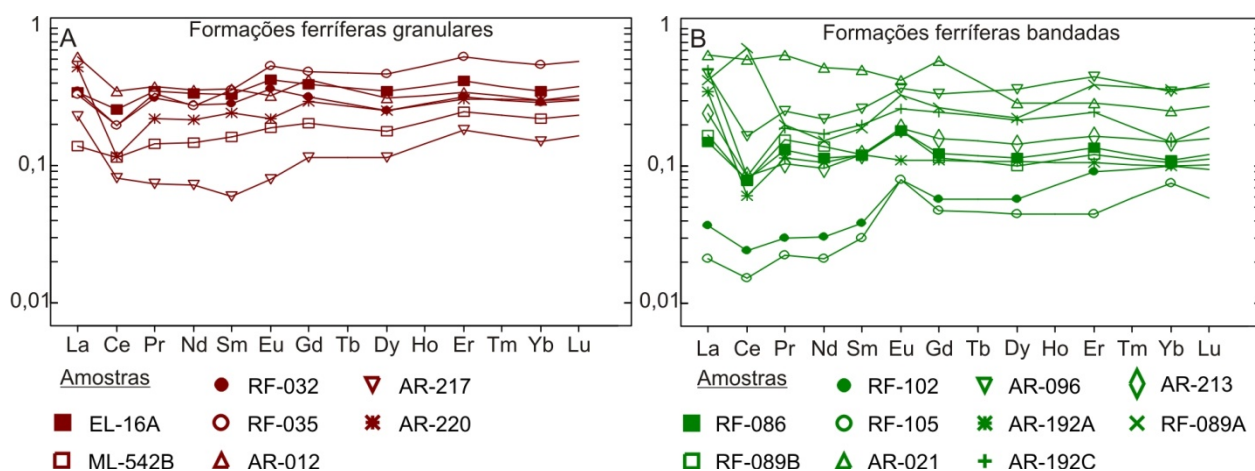


Figura 11 – Padrão ETR normalizado ao PAAS (*Post-Arquean Australian Shale*) para as amostras de rochas ferríferas granulares (A) e bandadas (B) nas áreas de estudo dos polígonos nordeste e sudoeste na Faixa Seridó.

4.2.4 NATUREZA E AMBIENTE TECTÔNICO DAS FORMAÇÕES FERRÍFERA

Alguns autores como Johannesson et al. (2006) e Ilouga et al. (2013) discutem alterações na distribuição elementar de formações ferríferas aliados a processos metamórficos e/ou intempéricos, algo comum que ocorreu por exemplo na região da Faixa Seridó. É possível realizar análises gráficas com o uso dos elementos traços Zr versus Th, Ti versus Zr e Ti versus Th para observar o grau de pureza de formações ferríferas (Figura 12). Viehmann et al. (2016) estudaram a pureza química das formações ferríferas de Urucum conseguindo discriminar as BIFs puras daquelas que são impuras e influenciadas por aporte de material sedimentar. Abrahão Filho (2016) estudou amostras das formações ferríferas bandadas de Senador Elói de Sousa, no Rio Grande do Norte, que se posicionaram em grande parte em campos de FF's puras ou transicionais a sedimentos químico-exalativos dotados de alguma contribuição sedimentar.

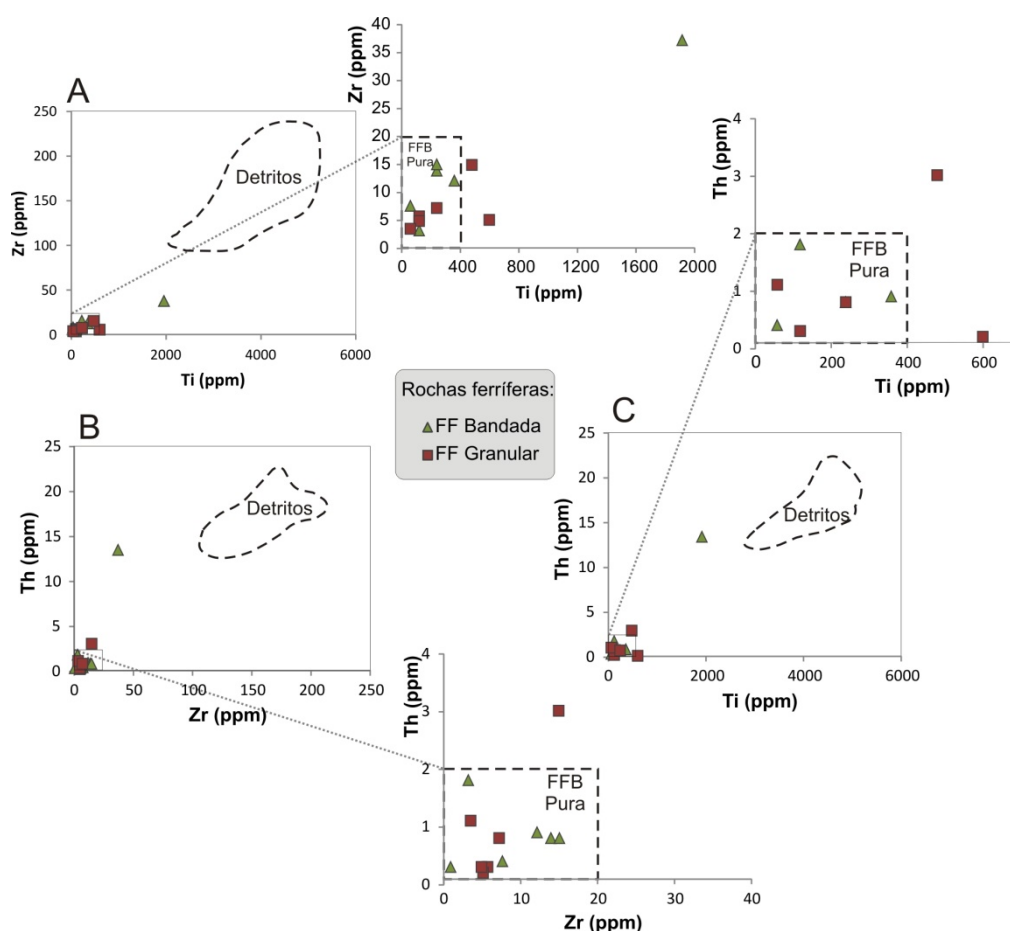


Figura 12 – Diagramas binários utilizando elementos traços para análise de pureza de formações ferríferas (FF) segundo Viehmann et al. (2016). (A) Ti versus Zr; (B) Zr versus Th e (C) Ti versus Th. Nesses gráficos, o campo "Detritos" indica onde estão plotadas as amostras de sedimentos siliciclásticos finos. O campo "FFB Pura" reflete onde estão plotadas as amostras de formação ferrífera bandada (FFB) puras. As FF's da Faixa Seridó estão posicionadas principalmente internas ou nas imediações dos campos "FFB Pura", refletindo seus elevados graus de pureza, com baixa contribuição sedimentar.

As formações ferríferas bandadas e granulares das áreas de estudo, na Faixa Seridó, posicionam-se principalmente no campo de "FFB Pura". Apenas algumas posicionaram-se fora desse campo, porém bem próximas, refletindo baixos níveis de impureza. Somente a amostra AR-021 nos gráficos de Th versus Zr e Th versus Ti aproximou-se do campo "Detritos" evidenciando a influência da presença de material siliciclástico como corroborado pela petrografia (maior quantidade de microclínio).

Para conhecimento do processo genético que sugere que sedimentos químicos ricos em metais hidrotermais podem ser distinguidos de depósitos hidrógenos formados por processos diagenéticos ou não hidrotermais é possível analisar graficamente os elementos Al, Si, Fe e Mn baseados em suas abundâncias relativas (Bonatti 1975; Adachi et al. 1986). Através do gráfico de Al_2O_3 versus SiO_2 (Figura 13A) observa-se que as formações ferríferas granulares e bandadas das áreas de trabalho resultam da ação de fluidos hidrotermais submarinos, corroborando com o diagrama ternário Al-Fe-Mn (Figura 13B) que apresenta o mesmo resultado, ou seja, as formações ferríferas estudadas configuram sedimentos químico-exalativos hidrotermais. A amostra RF-089A, de minério de ferro maciço, está no campo de depósitos hidrógenos no diagrama Al_2O_3 versus SiO_2 , porém no diagrama ternário Al-Fe-Mn é confirmada como resultante da ação de fluidos hidrotermais.

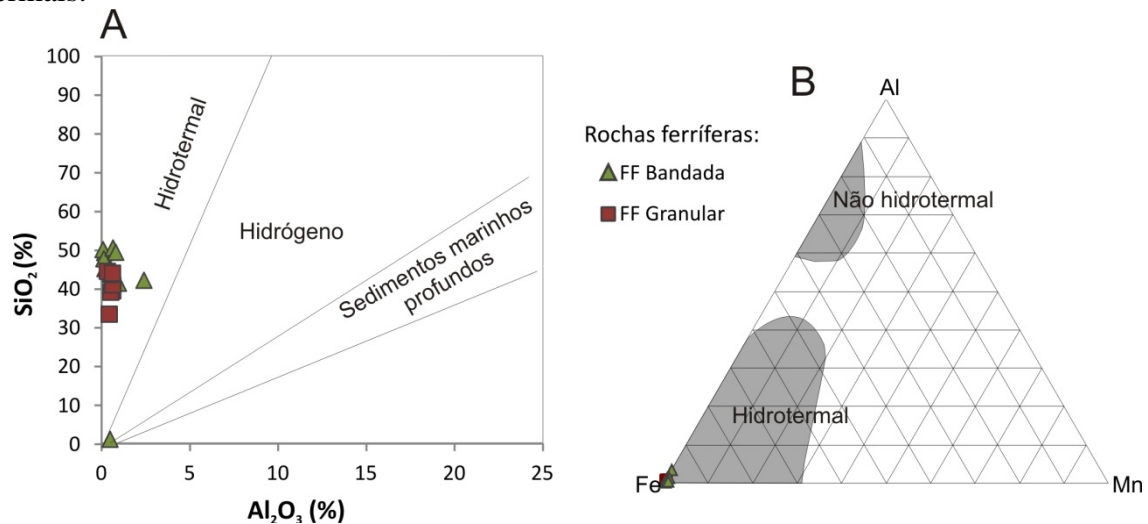


Figura 13 – (A) Diagrama binário Al_2O_3 versus SiO_2 de Bonatti (1975) e (B) Diagrama ternário Al-Fe-Mn de Adachi et al. (1986) mostrando o tipo de formação ferrífera em relação ao processo genético. Em ambos os casos as formações ferríferas (FF) granulares e bandadas estudadas na Faixa Seridó estão relacionadas a fluidos hidrotermais de água oceânica.

Os ambientes tectônicos podem ser definidos através de gráficos com as razões $Al_2O_3/(100-SiO_2)$ versus $Fe_2O_3/(100-SiO_2)$ de Murray (1994) (Figura 14A) e SiO_2 versus K_2O/Na_2O de Roser & Korsch (1986) (Figura 14B). As amostras de formações ferríferas granulares e bandadas nas áreas de estudo da Faixa Seridó estão plotadas em campos próximos a cadeias oceânicas (Figura 14A) localizadas nas imediações de margens continentais ativas transicionais e arcos de ilha (Figura 14B). Apenas a amostra AR-021 encontra-se no campo de margem passiva (Figura 14B).

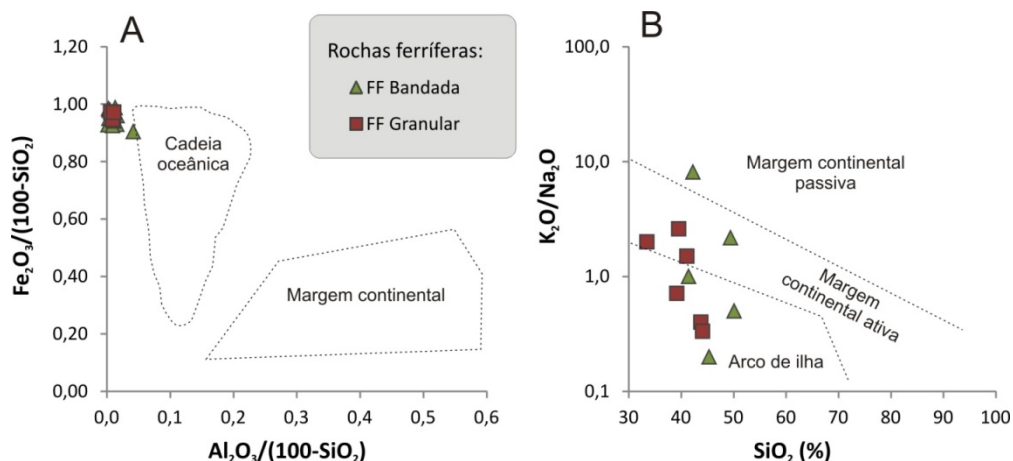


Figura 14 – (A) Diagrama $Al_2O_3/(100-SiO_2) \times Fe_2O_3/(100-SiO_2)$ (Murray 1994) com as amostras de formações ferríferas (FF) granulares e bandadas da Faixa Seridó próximas ao campo de cadeias oceânicas. (B) Diagrama $SiO_2 \times K_2O/Na_2O$ (Roser & Korsch 1986) com as amostras de formações

ferríferas granulares e bandadas da Faixa Seridó principalmente entre os campos de margens continentais ativas e arcos de ilha.

5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Através da petrografia realizada nesse estudo identificou-se dois grupos distintos, separados pelas suas características texturais (homogêneas ou granulares e bandadas). Apresentam composição mineralógica simples, marcada pelo predomínio de quartzo, óxidos de ferro (magnetita e hematita) e anfibólios, que variam em percentual, permitindo subdividir ainda mais dois grupos de rochas para cada tipo textural, separadas por fácies minerais. As formações ferríferas granulares e bandadas com até 10% de anfibólios são de fácies óxidos e aquelas com 15-30% de anfibólios são de fácies óxido-silicato. A fácies óxido é mais comum nas formações ferríferas granulares que as fácies óxido-silicato, enquanto que ambas ocorrem com a mesma frequência nas formações ferríferas bandadas. Os minerais opacos são magnetita e hematita, a qual ocorre em grande parte como produto de martitização, provavelmente originada durante a evolução do metamorfismo à medida que água foi liberada nas reações metamórficas. Os anfibólios identificados no MEV-EDS foram os cálcicos (actinolita, ferro-actinolita e ferro-edenita) e ferromagnesianos (grunerita) e a condição de cristalização conjunta desses dois grupos de minerais é possível com a existência de componentes cálcicos durante a precipitação das rochas ferríferas.

As associações minerais observadas são comuns aos dois grupos de rochas estudados. O crescimento de cristais de quartzo ocorre associado a cristais de magnetita e anfibólios, mesmo quando o bandamento milimétrico típico da formação ferrífera bandada mostra a concentração de níveis mais ricos em quartzo, minerais opacos (magnetita e hematita) e anfibólios intercalados. As relações de inclusões minerais são variadas, pois quartzo, opacos e anfibólios ocorrem como inclusões uns nos outros, indicando diferentes gerações durante o metamorfismo. No geral, todo o conjunto observado são de associações minerais de grau metamórfico médio (xisto verde e anfibolito), com temperaturas que variam de 450 até 550°C e pressões que variam de 2 até 5 kbar.

Quanto à litoquímica das rochas ferríferas das áreas de estudo, a análise dos elementos maiores permitiu identificar que as rochas ferríferas granulares e bandadas assemelham-se com os tipos Algoma e Rapitan do Canadá. SiO_2 e $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ somam mais de 90% das amostras e apresentam uma correlação negativa ou antitética, resultado de uma caracterização petrográfica bimodal, representados por quartzo e minerais de ferro, principalmente óxidos e hidróxidos de ferro.

O gráfico de concentração de elementos traços normalizados pelo PAAS indica claramente o agrupamento de rochas com as amostras de formações ferríferas granulares apresentando um comportamento mais regular, com as mesmas anomalias positivas e negativas em relação ao PAAS. Porém as amostras de rochas ferríferas bandadas apresentam dois conjuntos de amostras distintos. Um grupo apresenta as mesmas anomalias positivas e negativas das rochas ferríferas granulares, enquanto o outro apenas positivas de Mo e Pb. Porém todas as amostras de formações ferríferas bandadas apresentam uma anomalia discreta de Ni em relação ao PAAS, distinguindo-se das amostras de formações ferríferas granulares. Provavelmente as formações ferríferas bandadas foram geradas por lixiviação submarina de rochas máficas ou ultramáficas como sugerido por Sial et al. (2015).

Os teores dos elementos terras raras são baixos (teor máximo de 57 ppm e médio de 3 ppm), corroborando com aqueles observados nas BIF's fácies óxido de todo o mundo. Nas rochas ferríferas bandadas a concentração dos ETR é mais variada, pois as curvas de cada amostra apresentam comportamento mais diversificado, corroborado com a variação mineralógica perante a variação percentual de anfibólios. As anomalias negativas de Ce e positivas de Eu são normalmente pronunciadas. Ocorre leve fracionamento dos ETRP, mas o comportamento é bem linear, sem fracionamento. Apenas a amostra AR-021 tem comportamento distinto de todo o

grupo, porém é uma amostra com uma quantidade significativa de microclínio e leve alteração para argilominerais, de uma formação ferrífera com forte componente siliciclástico. O padrão de terras raras das rochas ferríferas granulares é mais consistente, indicando que as rochas são mais similares quimicamente. As concentrações de ETR são próximas. As rochas apresentam anomalia negativa de Ce e positiva e negativa de Eu, porém pouco pronunciadas (próximo de 1). O fracionamento dos ETRP é mais discreto, porém mais consistentes (curvas mais similares) que nas formações ferríferas bandadas.

As anomalias de Ce são predominantemente anomalias negativas verdadeiras, típicas de ambiente oxidante, exceto para amostra AR-021 e RF-089A, ambas de formação ferrífera bandada. As amostras AR-012 e AR-102 de formação ferrífera bandada e ML-542B de formação ferrífera granular apresentam anomalias positivas de La, que mascaram as anomalias negativas de Ce. Todas as outras amostras que estão dispersas no campo de anomalias negativas verdadeiras de Ce estão amplamente dispersas indicando representantes diversos de condições de oxidação da bacia, evidenciando ambientes transicionais entre os sítios deposicionais, mas em bacias distintas, de idades diferentes.

As anomalias positivas de Eu indicam que a maior parte das amostras de formação ferrífera bandada estão mais próximas de chaminés hidrotermais oceânicas, enquanto as amostras de formações ferríferas granulares estão em porções mais distais. Nesse caso as anomalias são negativas (< 1) ou positivas próximas de 1.

Quanto à natureza da formação das rochas ferríferas, os gráficos binários com as relações entre Th, Zr e Ti, permitiram identificar que os grupos de formações ferríferas granulares e bandadas estudados neste trabalho são rochas puras quimicamente, com poucos níveis de impurezas, exceto a amostra AR-021 que teve presença de material siliciclástico durante a sua deposição. Diagramas binários de SiO_2 e Al_2O_3 e ternários de Al-Fe-Mn indicam que as amostras de formações ferríferas bandadas e granulares foram formadas pela ação de fluidos hidrotermais submarinos, ou seja configuram sedimentos químico-exalativos hidrotermais.

Os diagramas específicos para identificação dos ambientes tectônicos para formação das rochas ferríferas granulares e bandadas estudadas na Faixa Seridó indicam principalmente cadeias oceânicas localizadas nas imediações de margens continentais ativas transicionais a arcos de ilha. São condições parecidas com os modelos discutidos por Abrahão Filho (2016) para formações ferríferas bandadas no Arqueano e formações ferríferas bandadas por Sial et al. (2015) no Neoproterozoico.

As formações ferríferas granulares encaixadas nas rochas do Complexo Caicó são provavelmente paleoproterozoicas, enquanto as formações ferríferas bandadas estão encaixadas nas rochas da Formação Jucurutu de idade neoproterozoica. No primeiro caso sugere-se que as formações ferríferas granulares estão repousando sobre sequências de rochas metassedimentares correlatas ao Complexo Caicó. Mesmo ocorrendo provavelmente em períodos distintos, os dados observados sugerem que todo esse conjunto de amostras de rochas ferríferas granulares e bandadas foram depositados no mesmo contexto tectônico, de pequenas bacias marinhas rasas, em estágio avançado de fechamento, com forte influência de chaminés hidrotermais como proposto por Sial et al. (2015) e Abrahão Filho (2016). As formações ferríferas bandadas diferem ainda na presença de terrígenos em maior ou menor proporção, marcado pela variação mineralógica mais pronunciada de anfibólios, além da presença de Ni mais acentuada, indicando a lixiviação de rochas máficas ou ultramáficas em sistemas hidrotermais como observado por Sial et al. (2015).

Por fim, o modelo proposto para o contexto geológico, durante e após a deposição das formações ferríferas granulares e bandadas, encaixadas no Complexo Caicó e Formação Jucurutu, respectivamente, depositadas em períodos distintos, porém sob condições similares, pode ser observado na figura 15.

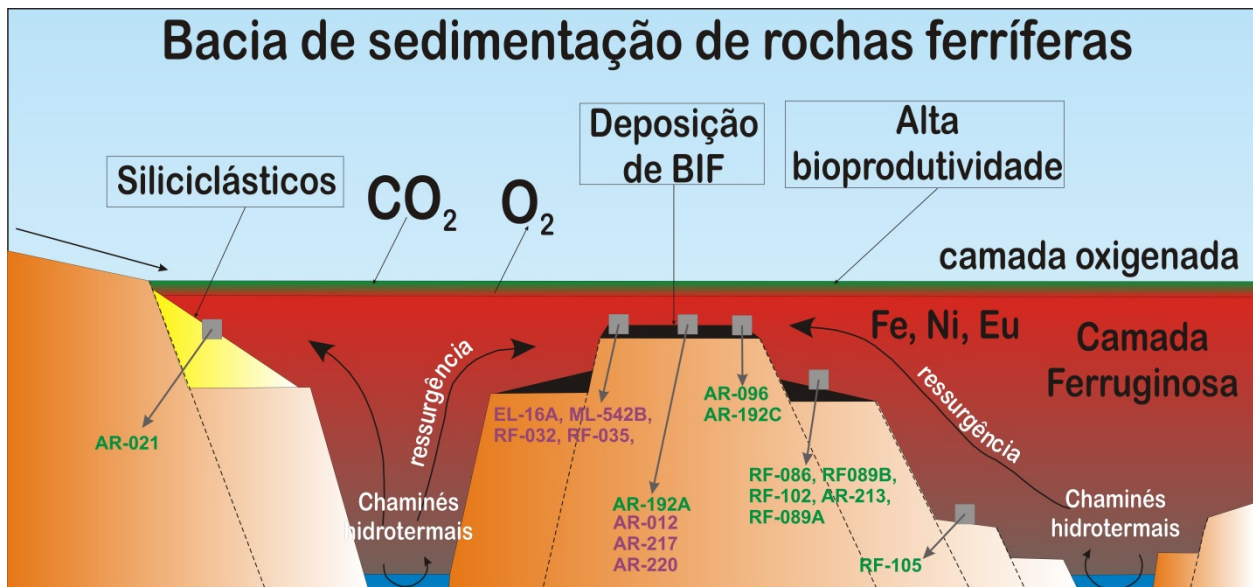


Figura 15 – Modelo deposicional esquemático proposto para as formações ferríferas granulares e bandadas estudadas nas áreas sudoeste e nordeste da Faixa Seridó (compilado de Sial et al. 2015). O quadrado cinza claro representa a amostra coletada. Em verde estão identificadas as amostras de formações ferríferas bandadas (correlacionadas as rochas da Formação Jucurutu) e em roxo as formações ferríferas granulares (correlacionadas as rochas do Complexo Caicó). Notar que próximo ao continente às formações ferríferas apresentam componentes siliciclásticos diluídos. A deposição das formações ferríferas ocorre na camada ferruginosa do oceano (óxica) em sítios mais distais ou mais proximais as chaminés hidrotermais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahão Filho, E.A. (2016). *A gênese das formações ferríferas e das rochas máficas associadas às rochas piroxeníticas da porção central do Maciço São José do Campestre, Rio Grande do Norte, Brasil*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências – Universidade de Brasília.
- Adachi, M., Yamamoto, K., Sugisaki, R. (1986). Hydrothermal chert and associated cherts from the Northern Pacific, their geological significance as indication of ocean ridge activity. *Sediment. Geol.*, 47: 125–148.
- Appel, P.W.U. (1987). Geochemistry of the Early Archean Isua Iron Formation, West Greenland. In: P.W.U. Appel & G.L. LaBerge (eds.) *Precambrian Iron-Formations*. Athens. Theophrastus Publications, p.: 31-69.
- Angelim, L.A.A., Nesi, J.R., Torres, H.H.F., Medeiros, V.C., Santos, C.A., Veiga Junior, J.P., Mendes, V.A. (2006). *Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte: Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte Escala 1:500.000*. Serviço Geológico Brasileiro (CPRM): Recife.
- Bau, M., Dulski, P. (1996). Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79 (1-2): 37-55.
- Bau, M., Möller, P. (1993). Rare earth element systematics of the chemically precipitated component in Early Precambrian iron-formations and the evolution of the terrestrial atmosphere–hydrosphere–lithosphere system. *Geochim. Cosmochim.*, 57 (10): 2239-2249.
- Bekker, A., Slack, J.F., Planavsky, N., Krapez, 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: p. 467-508.

- Beukes, N.J. e Klein, C. (1992). Models for iron-formation deposition. In: Shopf and Klein (eds.) *The Proterozoic Biosphere a multidisciplinary study*. New York, Cambridge University Press, p.: 147-152.
- Bonatti, E. (1975). Metallogenesis at oceanic spreading centres. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 3: 401-433.
- Brito Neves, B.B., Santos, E.J., Van Schmus, W.R. (2000). Tectonic History of the Borborema Province, Northeast Brazil. In: Cordani, U. G., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31ST IGC, p. 151-182.
- Campos M.S. (2011). *Químioestratigrafia isotópica de carbono e estrôncio e geoquímica de elementos terras raras em formações carbonáticas e ferríferas do cinturão Seridó, Nordeste do Brasil*. Dissertação de Mestrado. CTG – Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.
- Campelo R.C. (1999). *Análise de terrenos na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil: Integração de dados geológicos e gravimétricos*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Cavalcante, R., Cunha, A.L.C., Medeiros, V.C. (2015). *Programa Geologia do Brasil-PGB. Projeto Provincias Metalogenéticas do Brasil: Area PB – RN (Borborema Leste). Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba*. 1 mapa colorido, 90,00 x115,00cm. Escala 1:250.000.
- Costa, A.P., Dantas, A.R. 2014. *Programa Geologia do Brasil-PGB. Lajes. Folha SB.24-X-D-VI. Estado do Rio Grande do Norte. Carta Geológica*. Recife: CPRM, 1 mapa colorido, 90,00 x 70,00cm. Escala 1:100.000.
- Dantas, A.R., Costa, A.P. (2014). *Programa Geologia do Brasil-PGB. Lajes. Folha SB.24-X-D-VI. Estado do Rio Grande do Norte. Carta de Recursos Minerais*. Recife: CPRM, 1 mapa colorido, 91,0 x 67,0 cm. Escala 1:100.000.
- Dantas, E.P., Cruz, R.F., Nascimento, M.A.L., Dantas, A.R. (2012). *Programa Geologia do Brasil - PBG. Currais Novos. Folha SB.24-Z-B-II. Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Carta de Recursos Minerais*. Recife: CPRM, 1 mapa colorido, 91,06 x 59,30 cm. Escala - 1:100.000.
- Davy, R. (1983). A contribution on the chemical composition of Precambrian Iron-Formations. In: A.F. Trendall & R.C. Morris (eds.) *Iron Formation Facts and Problems*. Amsterdam, Elsevier, p.: 325-343.
- Dedavid, B.A., Gomes, C.I., Machado, G. (2007). *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS. ISBN: 978-85-7430-702-2.
- Fernandes, N.H., Carvalho, S.G., Zanardo, A., Fernandes, T.M.G. (2003). Grau metamórfico das formações ferríferas do greenstone belt Morro do Ferro: abordagem utilizando texturas de exsolução em anfibólios. *Geociências*, 22: 53-63.
- Fernandes, N.H., Carvalho, S.G., Fernandes, T.M.G. (2004). As Formações Ferríferas do Greenstone Belt Morro do Ferro no Sudoeste do Estado de Minas Gerais. *Revista de Geologia*, 17, nº 1: 7-21.
- Ferreira, A.C.D., Dantas, E.L., Souza, V.S. (2015). Litogeoquímica das formações ferríferas bandadas da região de Lajes-RN, Terreno Rio Piranhas, Domínio Rio Grande do Norte, NE do Brasil. *15 Congresso Brasileiro de Geoquímica*, Resumos expandidos. Brasília: SBGq,
- Figueiredo, B.S. (2012). *Geoquímica e gênese das formações ferríferas e metacarbonatos da porção sul do Maciço São José do Campestre, Província Borborema*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências – Universidade de Brasília.
- Gross, G.A. (1983). Tectonic systems and the deposition of iron-formation. *Precambrian Research*, 20: 171-187.

- Gross, G.A., Mcleod, C.R. (1980). A preliminary assessment of the chemical composition of iron formation in Canada. *Can. Mineral.*, 18: 223-229.
- Haase, C.S. (1982a). Metamorphic petrology of the Negaunee Iron Formation, Marquette district, northern Michigan: Mineralogy, metamorphic reactions and phase equilibria. *Econ. Geol.*, 77: 60-81.
- Haase, C.S. (1982b). Phase equilibria in metamorphosed iron-formations: qualitative T-X (CO₂) petrogenetic grids. *Am. J. Sci.*, 282: 1623-1655.
- Haskin, L.A., Haskin, M.A., Frei, F.A., Wildman, T.R. (1968). Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: Ahrens L.H. (ed.), *Origin and distribution of the elements*, vol. 1. Pergamon, Oxford, p.: 889-911.
- Hollanda, M.H.B.M., Archanjo, C.J., Souza, L.C., Liu, D., Armstrong, R. (2011). Long-lived Paleoproterozoic granitic magmatism in the Seridó-Jaguaribe domain, Borborema Province–NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 287–300.
- Hollanda, M.H.B.M., Archanjo, C.J., Bautist, J.R., Souza, L.C. (2015). Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): Evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. *Precambrian Research*, 258: 186–207.
- Ilouga, D.C.I, Suh, C.E., Tanwi, G.R. (2013). Textures and Rare Earth Elements Composition of Banded Iron Formations (BIF) at Njweng Prospect, Mbalam Iron Ore District, Southern Cameroon. *Int. J. Scie. Res.*, 4: 146-165.
- James, H.L. (1954). Sedimentary facies of iron-formation. *Econ. Geol.*, 49: 235-293.
- James, H.L. (1955). Zones of regional metamorphism in the Precambrian of northern Michigan. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 66: 1455-1487.
- Jardim de Sá, E.F. (1994). *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-Africana*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências – Universidade de Brasília..
- Jardim de Sá, E.F., Salim, J. (1980). Reavaliação dos conceitos estratigráficos na região do Seridó (RN-PB). *Mineração e Metalurgia*, 80, n. 421: 16-28.
- Johannesson, K.H., Hawkins, D.L., Cortés, A. (2006). Do Archean chemical sediments record ancient seawater rare earth element patterns? *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70: 871-890.
- Klein, C. (1973). Changes in mineral assemblages with metamorphism of some banded iron-formations. *Economic Geology*, 68: 1075–1088.
- Klein, C. (1983). Diagenesis and metamorphism of Precambrian iron-formations. In: A.F. Trendall and R.C. Morris (eds.) *Iron-Formation: Facts and Problems*, Elsevier, Amsterdam, p.: 417–469.
- Klein, C. (2005). Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. *American Mineralogist*, 90: 1473-1499.
- Klein, C., Beukes, N. (1993). Sedimentology and Geochemistry of the Glaciogenic Late Proterozoic Rapitan Iron-Formation in Canada. *Economic Geology*, 88: 542-565.
- Leake, B.E. et al. (1997). Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219-246.
- Liu, Y.-G., Miah, M.R.U., Achmitt, R.A. (1988). Cerium: a chemical tracer for paleo-oceanic redox conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 1361-1371.
- McLennan, S. M. (1989). Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin B.R. and McKay G.A. (eds.), *Geochemistry and Mineralogy of rare earth elements*. Reviews in Mineralogy, 21, p.: 169-200.

- Medeiros, V.C., Nascimento, M. A. L., Sousa, D.C. (2010). Geologia. In: P.A.S. Pfaltzgraff e F.S.M. Torres. (Org.). *Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Norte* (1ed). Rio de Janeiro: CPRM, 2010, p.: 15-38.
- Medeiros, V.C.; Nascimento, M.A.L.; Galindo, A.C.; Dantas, E. L. (2012a). Augen gnaisses riacianos no Domínio Rio Piranhas – Seridó, Província Borborema, Nordeste do Brasil. *Geologia-USP, Série Científica*, 12 (2):3-14.
- Medeiros, V.C., Nascimento, M.A.L., Dantas, E.L., Cunha, A.L.C., (2012b). *Programa Geologia do Brasil-PGB. Currais Novos. Folha SB.24-Z-B-II. Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Carta Geológica*. Recife: CPRM, 1 mapa colorido, 91,04 x 65,79 cm. Escala 1:100.000.
- Murray, R.W. (1994). Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications. *Sediment. Geol.*, 90: 213-232.
- Planavsky, N., Bekker, A., Rouxel, O. J., Kamber, B., Hofmann, A., Knudsen, A., Lyons, T. W. (2010). Rare Earth Element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: new perspectives on the significance and mechanisms of deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 (22): 6387-6405.
- Raposo, F.O. (1996). *Formações ferríferas e metassedimentos químicos de áreas selecionadas do quadrilátero ferrífero e suas relações com níveis rudáceos*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências – Universidade Federal de Minas Gerais.
- Roser, B.P., Korsch, R.J. (1986). Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *J. Geol.*, 94: 635-650.
- Sampaio, N.P. (2016). *Construção de Banco de Dados de Minerais Brasileiros para Analisador Mineral Integrado, acoplado a Sistema MEV-EDS Automatizado*. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto.
- Sial, A.N., Campos, M.S., Gaucher, C., Frei, R., Ferreira, V.P., Nascimento, R.C., Pimentel, M.M, Pereira, N.S., Rodler, A. 2015. Algoma-type Neoproterozoic BIFs and related marbles in the Seridó Belt (NE Brazil): REE, C, O, Cr and Sr isotope evidence. *Journal of South American Earth Sciences*, 61: 33-52.
- Silva, Filho C.V.R. (2012). *Isótopos de Nd aplicados à datação direta de formações ferríferas paleoarqueanas do Maciço São José do Campestre, Rio Grande do Norte-RN*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências – Universidade de Brasília.
- Souza, Z.S., Martin, H., Peucat, J.J., Jardim de Sá, E.F., Macedo, M.H.F. (2007) Calc-alkaline magmatism at the archean-proterozoic transition: the Caicó Complex basement (NE Brasil). *Journal of Petrology*, 48 (11): 2149-2185.
- Spier, C.A., Oliveira, S.M.B., Sial, A.N., Rios, F.J. (2007). Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 152: 170-206.
- Trendall, A.F. (2002). The Significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record. In: W. Altermann & P.L. Corcoran. *Precambrian Sedimentary Environments: A modern approach to ancient depositional systems*. Bodmin, Blackwell Science, p.: 33 – 66. ISBN: 0-632-06415-3.
- Van Schmus, W.R., Brito Neves, B.B., William, I.S., Hackspacher, P.C., Fetter, A.H., Dantas, E.L., Babinski, M. (2003). The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U-Pb detrital zircon ages and Sm-Nd crustal residence (TDM) ages. *Precambrian Research*, 127: 287-327.
- Viehmann, S., Bau, M., Bühn, B., Dantas, E.L., Walde, D.H.G. (2016). Geochemical characterisation of Neoproterozoic marine habitats: Evidence from trace elements and Nd isotopes in the Urucum iron and manganese formations, Brazil. *Precambrian Res. Manuscript*.
- Wright, J., Schrader, H., Holser, W.T. (1987). Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite. *Geochim. Cosmochim Acta*, 51: 631-644.

