UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Proposta metodológica sobre dados de geofísica aeroportada
na prospecção de minério de Fe: indicação de ambientes
geológicos propícios e geração de mapa de probabilidade na
região de Curral Novo do Piauí (PI).**

Enos Nobuo Sato

Orientador: Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Recursos Minerais e Hidrogeologia

Apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Recursos Minerais e Hidrogeologia.

SÃO PAULO

2011

AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROPOSTA METODOLÓGICA SOBRE OS DADOS DE GEOFÍSICA AEROPORTADA NA PROSPECÇÃO DE MINÉRIO DE FE: INDICAÇÃO DE AMBIENTES GEOLÓGICOS PROPÍCIOS A GERAÇÃO DE MAPA DE PROBABILIDADE NA REGIÃO DE CURRAL NOVO DO PIAUÍ (PI).

Enos Nobuo Sato

Orientador: Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Recursos Minerais e Hidrogeologia

COMISSÃO JULGADORA

PRESIDENTE: Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

EXAMINADORES:

Nome:

Prof. Dr.

Prof. Dr.

SÃO PAULO

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Sato, Enos Nobuo (2011).

Proposta metodológica sobre dados de geofísica aeroportada na prospecção de minério de Fe: indicação de ambientes geológicos propícios e geração de mapa de probabilidade na região de Curral Novo do Piauí (PI).

69 páginas; 15 Ilustrações

Dissertação de Mestrado: IGC/USP

Orientador: Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

Palavras chave:

1.Prospecção de minério de ferro; 2.Formações ferríferas, 3.Geofísica, 4.Mapas de probabilidade de ocorrência.

Hokusai, K. – *Trinta e seis vistas do Monte Fuji. A grande onda Kanagawa*, c.1830-1832.

Dedico este trabalho aos meus pais, gigantes, os quais me colocaram nos ombros pra ver mais longe! Maria José Sato e Nobuo Sato, a vocês meu carinho, afeto e muito obrigado.

E a equipe do projeto Planalto Piauí, pelo talento, amizade, dedicação e perseverança.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida pela fé e entusiasmo constante na realização do trabalho e Vilson Marque Dias, sua força, exemplo e orientação nos trabalhos de campo, a quem devo grande parte do que aprendi em exploração mineral.

Aos professores Jorge Kazuo Yamamoto e Marcelo Monteiro da Rocha pelas discussões sobre a matemática toda e as aplicações para identificação de anomalias e processos para tratamento dos dados.

Ao Carlos Tomba, dono de um talento para geologia como poucos e que sempre proporcionou boas discussões geológicas sem contar boas risadas das trapalhadas da vida.

Ao professor Silvio R.F. Vlach, que me iniciou nas jornadas acadêmicas, e ao Frederico Vilalva (Jáu), pelas conversas e discussões de outros temas, mas que de alguma forma sempre são aproveitadas.

Aos geólogos e amigos: Guilherme José Rampazzo, Nyemer Pivetta da Costa, Leandro Prado Costa, Duílio Rondinelli, Carolina Nalin e Bernard Oliveira, pelo apoio no trabalho e durante a realização desta dissertação, a ajuda de vocês foi pedra fundamental em vários aspectos.

Gostaria de agradecer a *Global Mine Exploration* Participações e Empreendimentos S.A.(GME4) atual BEMISA – Brasil Exploração Mineral S.A. pelo apoio e incentivo recebido durante a realização dos trabalhos assim como proporcionar a utilização dos dados de geofísica referentes à área do Projeto Planalto Piauí, para realização dos trabalhos da Dissertação de Mestrado. Da mesma forma meu agradecimento a Diretoria de Exploração representada pelos senhores Washington Rydz e Adalberto Ribeiro. Agradeço também à Angela Dannemann, pelas orientações e apoio na obtenção dos dados.

Ao Caio França Jatobá Junior pela confiança depositada e desde o início incentivar a realização de um mestrado com tema de viés para aplicação em prospecção mineral e ao João Cavalcanti de Oliveira por apoiar de forma incansável a geologia no Brasil e acreditar que geólogos são imprescindíveis para o desenvolvimento de uma nação como o Brasil.

A RECONSULT e a MICROSURVEY, que levantaram e fizeram o tratamento inicial dos dados que foram base para a realização deste trabalho.

Difficulties mastered are opportunities won.

Winston Churchill

RESUMO

A dissertação tem por cerne dois textos complementares, ambos refletindo o histórico de um programa de exploração mineral no distrito ferrífero de Curral Novo do Piauí. Como trabalho executado por empresa, a discussão sobre os custos e a definição de prioridades foram aspectos continuamente considerados. Assim os textos referidos refletem essas preocupações e se referem à proposição de métodos voltados à definição dos ambientes geológicos propícios à ocorrência de formações ferríferas à magnetita e à definição de probabilidade de ocorrências destes ambientes na fase de *reconnaissance* da pesquisa. Na contextualização geológica do tema apresenta-se aspectos da geologia e uma discussão dos tipos e origens das formações ferríferas bandadas. Nos trabalhos foram aplicadas diversas técnicas, incluindo estatística multivariada, processamento digital de imagens, mapeamento geológico sistemático de superfície e subsuperfície em testemunhos de sondagens, caracterização petrográfica de rochas, geofísica de exploração a partir da utilização de métodos potenciais (magnetometria e radiometria).

Palavras-chave: prospecção de minério de ferro, formações ferríferas, geofísica, mapas de probabilidade de ocorrência.

ABSTRACT

This dissertation presents two complementary manuscripts, both reflecting the history of an exploration program in the Ferriferous Mineral District of Curral Novo do Piauí. As a research performed by a company, the discussion about the costs and prioritization aspects were continuously considered. The manuscripts reflects these concerns, referring to the proposition of methods aimed at defining the geological environments conducive to the occurrence of magnetite iron formations and the definition of probability of occurrence of these environments during the research reconnaissance phase. In the introductory chapter are presented the geological context and also a discussion of types and genesis of banded iron formations. In these studies were applied several techniques, including multivariate statistics, digital image processing, systematic geological surface mapping, diamond drill surveys, petrographic characterization of rocks and exploration geophysics methods (magnetometric and radiometric).

Keywords: iron ore exploration, banded iron formations, geophysics, probability occurrence maps.

Sumário

1.0	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	DA ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	11
1.2	APRESENTAÇÃO DO TEMA.....	12
1.3	A ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO	13
2.0	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	13
2.1	FORMAÇÕES FERRÍFERAS	15
2.2	ORIGEM DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS.....	18
2.3	GEOLOGIA LOCAL.....	24
3.0	IDENTIFICAÇÃO DE ASSINATURAS GEOFÍSICAS DE AMBIENTES DE OCORRÊNCIA DE FORMAÇÕES FERRÍFERAS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS.	28
4.0	ÍNDICE E CARTAS DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIAS DE DEPÓSITOS DE MINÉRIO DE FERRO: PROPOSTA DE ABORDAGEM GEOFÍSICA DESENVOLVIDA NA REGIÃO DE CURRAIS NOVOS DO PIAUÍ (PI).	48
5.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULOS 1 E 2 - INTRODUÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO

Figura 1 - Diagrama esquemático da abundância de formação ferrífera ao longo do tempo geológico (modificado de Klein, 2005). O tempo decorre da direita para a esquerda, e os números mostram bilhões de anos (Ga) antes do presente. O eixo das ordenadas, não quantificado, representa uma estimativa subjetiva de abundância, relativa ao volume dos depósitos do Grupo Hamersley. A área em verde representa a idade dos litotipos do Complexo Granjeiro nos quais estão inseridas as formações ferríferas de Curral Novo do Piauí. A curva pontilhada em azul representa as proporções de oxigênio presente na atmosfera para os intervalos marcados no eixo da abscissa e a linha vermelha pontilhada representa as concentrações de oxigênio na atmosfera.

Figura 2 - A) Diagrama discriminatório AFM; B) Diagrama SiO₂ x Ferro Total; C) Diagrama TAS e D) Diagrama V x Ti.

CAPÍTULO 3 - IDENTIFICAÇÃO DE ASSINATURAS GEOFÍSICAS DE AMBIENTES DE OCORRÊNCIA DE FORMAÇÕES FERRÍFERAS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo localidade de Massapê - Manga Velha (área de trabalho).

Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo com localização dos perfis amostrados.

Figura 3 - Fluxo do processamento dos dados na utilização da APC.

Figura 4 - Perfis dos canais da contagem total e anomalia do sinal analíticos sobrepostos à geologia indicando a ambiência de ocorrência das formações ferríferas.

Figura 5 - Gráfico do *Scree plot* para as 4 PCs analisadas.

Figura 6 - Mapas das quatro principais componentes analisadas com sobreposição das formações ferríferas identificadas no mapeamento geológico. Os gráficos indicam as cargas das componentes principais indicando qual das variáveis tem maior influência nos cálculos. As formações ferríferas são apresentadas em preto.

Figura 7 - Perfis dos canais de anomalia do sinal analítico, contagem total, das 4 PCs geradas a partir dos dados gamaespectrométricos.

CAPÍTULO 4 - ÍNDICE E CARTAS DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIAS DE DEPÓSITOS DE MINÉRIO DE FERRO: PROPOSTA DE ABORDAGEM GEOFÍSICA DESENVOLVIDA NA REGIÃO DE CURRAIS NOVOS DO PIAUÍ (PI).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo

Figura 2 - Gráfico de análise do comportamento dos valores obtidos para a variável Z.

Figura 3 - Histograma da variável Z, probabilística, a partir da qual foram delineados os ambientes com anomalias possíveis e prováveis.

Figura 4 - Mapas da Contagem Total, em contagem por segundo (cima), e do Sinal Analítico, em nT/m, variáveis originais a partir das quais foi gerado o índice TC-ASA, com a subtração dos valores da Contagem Total dos valores do Sinal Analítico.

Figura 5 - Mapas do índice TC-ASA (cima) e mapa da variável Z, probabilística obtida a partir da normalização do índice TC-ASA.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos ambientes anômalos e suas respectivas áreas de abrangência dentro da área do levantamento aerogeofísico, para variável Z.

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 DA ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A maioria dos trabalhos de conclusão de cursos de pós-graduação em geociências ainda é sob a forma de dissertações e teses tradicionais. Nos últimos anos, entretanto, alunos do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo vêm adotando a possibilidade alternativa, prevista regimentalmente, de apresentar um texto introdutório ou complementar e anexar trabalhos submetidos a periódicos. Esta prática vem se firmando como voga na instituição, pois procura conciliar a apresentação da evolução no conhecimento exigido e, ao mesmo tempo, expor esta evolução à comunidade, o que é interessante para o autor, orientador, programa de pós-graduação e à sociedade que custeou a pesquisa. Assim foi esta a prática adotada nesta dissertação, com a anexação de dois artigos. Estes textos são registros de dois projetos individuais que se complementam, num objetivo geral de propor métodos para auxiliar a definição de estratégias e/ou minimizar custos de programas de prospecção de minério de ferro associado a formações ferríferas bandadas à magnetita.

Os estudos abrangeram aplicações de estatística multivariada, processamento digital de imagens, mapeamento geológico sistemático de superfície e de subsuperfície em testemunhos de sondagens, caracterização petrográfica de rochas, geofísica de exploração a partir da utilização de métodos potenciais (magnetometria e radiometria) além de uma ampla revisão bibliográfica sobre os principais temas abordados pelos artigos, ambos em processo de submissão a periódicos nacionais. Nesta primeira parte é apresentada uma breve discussão sobre os temas abordados, as principais motivações que influenciaram a pesquisa e a apresentação da geologia e das principais características das formações ferríferas.

Desta cooperação universidade-empresa espera-se gerar ao menos mais um artigo, que em função de prazos não pode ser concluído para compor esta dissertação.

1.2 APRESENTAÇÃO DO TEMA

Para a realização deste trabalho, no primeiro artigo, foi realizada a caracterização macroscópica e microscópica em seções polidas dos principais corpos mineralizados e suas encaixantes imediatas. Posteriormente foram analisadas as propriedades físicas das rochas e do minério, trabalhos que possibilitaram a precisa definição dos principais litotipos presentes na área foco de trabalho do primeiro artigo. A partir destas informações e da localização de ocorrências de minério de ferro, os dados geológicos puderam ser correlacionados com dados aerogeofísicos. Nesta etapa preliminar a caracterização foi qualitativa, permitindo verificar as assinaturas particulares das formações ferríferas presentes no distrito de Curral Novo.

Em etapa posterior os dados aerogeofísicos contratados pela BEMISA foram retrabalhados, com o comportamento magnetométrico e gamaespectrométrico analisados numericamente, utilizando estatística multivariada e tradicional. Estes estudos revelaram que os padrões preliminarmente qualitativos poderiam ser identificados numericamente. Verificou-se que a transformada do sinal analítico e o canal da contagem total, que conjuga o espectro dos canais do K, Th e U, quando utilizados conjuntamente marcam uma assinatura única, delineando a ambiência de ocorrência das formações ferríferas de Curral Novo a partir da subtração do canal da anomalia do sinal analítico do canal da contagem total. E estes dados, na forma de uma única variável, se ajustados para obtenção de apenas valores positivos no conjunto de dados, permite interpretação à luz de técnicas de probabilidade: para cada ponto amostrado no sobrevôo aerogeofísico, propõe-se haver um percentil representativo da probabilidade de ocorrência da ambiência favorável à ocorrência de formações ferríferas à magnetita. Acredita-se que estas probabilidades, quando estudadas em detalhe, podem vir a fornecer uma importante ferramenta de auxílio à tomada de decisões acerca de investimentos e avaliação de riscos em projetos de exploração mineral na fase de estudos de *reconnaissance*, em projetos de minério de ferro como o estudado nesta pesquisa.

1.3 A ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO

A escolha da área de estudo se deu em função de ser uma área de pesquisa requerida pela BEMISA para a seleção de alvos e geração de projeto de exploração mineral, o qual projeto que atualmente se encontra em fase de análise de pré-viabilidade de implantação de empreendimento mineiro. Por ser o autor funcionário daquela empresa, que apoiou a pesquisa desde o início, houve facilidade de visita às áreas do projeto e acesso aos dados gerados ao longo da progressão dos trabalhos, tornando possível a realização dos estudos apresentados.

Do ponto de vista metalogenético a Província Borborema ainda é uma nova fronteira a ser explorada tendo potencial para gerar grandes empreendimentos mineiros, graças a suas características peculiares do ponto de vista geológico-metalogenético. Caso sejam de fato realizados, tais empreendimentos trarão avanços sociais e na infraestrutura local, haja vista que a região de estudo é uma das regiões mais carentes do Brasil.

2.0 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Zona Transversal da Província Borborema, que equivale à Região de Dobramentos Nordeste de Brito Neves (1975). Constitui um domínio de intensa complexidade litoestrutural e de longa história crustal, onde são bastante evidentes os efeitos dos eventos tectônicos, termais e magmáticos do Cido Brasileiro, ressaltando a sua evolução policíclica (Santos & Brito Neves, 1984). Alcançam maiores expressões na Província os terrenos pré-cambrianos, em especial: o embasamento retrabalhado nos eventos Transamazônico e Brasileiro; as supracrustais do Proterozóico; e expressiva ocorrência de suítes graníticas Neoproterozóicas além das Coberturas Sedimentares do Fanerozóico (Ribeiro, 1991).

O domínio mais antigo, de idade arqueana, é formado por rochas do Complexo Gnaíssico-Migmatítico com rochas plutônicas associadas, articulado com associações tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG) e supracrustais metavulcanossedimentares, denominado Complexo Granjeiro por Bizzi *et al.* (2001), sendo, portanto, substrato das sequências supracrustais. Engloba grande variedade de litotipos, predominando rochas gnáissicas, tanto

de caráter orto como paraderivado. No que diz respeito à geocronologia, os dados disponíveis permitem o seu enquadramento no Neoarqueano a Paleoproterozóico (Brito Neves *et al.* 1982).

As supracrustais compreendem os metapelitos e metapsamitos, com considerável contribuição vulcânica, do Grupo Cachoeirinha. Os litotipos mais característicos são os cloritaxistos, sericita-cloritaxistos e albita-cloritaxistos. Esta unidade é considerada de idade mesoproterozóica por correlação com outras supracrustais da região. Um expressivo conjunto de granitóides Neoproterozóicos de composição variável entre granodioritos, monzonitos, quartzo-sieno granitos e álcali-sieno granitos completam o arcabouço pré-cambriano da região. As coberturas sedimentares fanerozóicas são representadas por sedimentos cretácicos da Bacia do Araripe, constituindo a Formação Santana, caracterizada pela associação de fácies siliciclásticas, evaporíticas e carbonáticas e pela Formação Exu, formada essencialmente por arenitos.

As formações ferríferas da localidade denominada Massapê-Manga Velha e demais ocorrências de ferro cadastradas nos arredores deste alvo mostram, como traço comum, a sua associação com componentes líticos do Complexo Granjeiro. De acordo com Santos (1996), o Complexo Granjeiro encerra duas associações litoestratigráficas diacrônicas, com o seguinte arranjo e particularidades: um conjunto mais antigo de rochas supracrustais, composto por metamáficas anfibolitizadas, tufo máficos e félsicos xistificados, *metacherts*, formações ferríferas, paragnaisses, calcissilicáticas, quartzitos e xistos paraderivados; presença de componentes vulcanossedimentares e indusão de horizontes químico-exalativos apontando para processos desenvolvidos em ambiente de crosta oceânica; uma unidade constituída por ortognaisses granodioríticos a tonalíticos com idade U-Pb SHRIMP 2,54 Ga (Silva *et al.* 1997) com evidências de intrusão e/ou assimilação das supracrustais em questão, atestando o caráter plutônico desses ortognaisses.

Estas interpretações relacionadas às supracrustais e aos ortognaisses, combinadas com idades modelo TDM obtidas nestas rochas no intervalo 2,65-2,55Ga, sugerem que o Complexo Granjeiro representa um remanescente arqueano de um sistema do tipo bacia oceânica-arco magmático.

2.1 FORMAÇÕES FERRÍFERAS

As formações ferríferas pré-cambrianas, conhecidas genericamente como formações ferríferas bandadas (*Banded Iron Formations* - BIFs), são únicas ao longo do registro geológico, face aos processos de formação (não atualísticos) e às potencialidades minerais. É de consenso geral que a maior concentração deste tipo de deposição situa-se entre unidades arqueanas e Paleoproterozóicas, sem ocorrência após 1,8 G.a, com exceção dos depósitos do final do Neoproterozóico, geralmente associados às sucessões sedimentares com influência glacial. Baseando-se nas proposições de James (1954) e Trendall (1983), Klein (2005) define as formações ferríferas como sedimentos químicos finamente laminados, onde a principal característica composicional é o alto conteúdo de ferro intercalado geralmente, mas não obrigatoriamente, com níveis de *chert*. Na definição original de James (1954) o limite mínimo do conteúdo de Fe é estabelecido em $\geq 15\%$.

Os registros de formações ferríferas mais antigos conhecidos são os da região de Issua, oeste da Groenlândia, datados de 3,8 Ga e relacionados a núcleos cratônicos arqueanos (Dymek & Klein, 1988; Klein, 2005). Outros exemplos arqueanos ocorrem associados a sequências do tipo *greenstone belt*, com idades entre 3,5 a 2,5 Ga, nos quais se inserem as ocorrências do Grupo Nova Lima de Minas Gerais (Dorr II, 1969) e do Grupo Lavapés no *greenstone belt* de Piumhi (Fernandes et al 2003) também em Minas Gerais. Nesse mesmo contexto, com base nas idades admitidas para o Complexo Granjeiro, inserem-se as ocorrências do Projeto Planalto-Piauí.

O registro das maiores ocorrências (em tamanho e volume de depósito) ocorre a aproximadamente 2,5 Ga, devido à magnitude das bacias de Hamersley, na Austrália, situadas entre 2,6 a 2,45 Ga (Trendall & Blockley, 1970), assim como as de Transvaal, na África do Sul, de idade aproximada entre 2,5 a 2,3 Ga (Klein & Beukes, 1989). Associados a esse intervalo de tempo encontram-se também os depósitos brasileiros do Grupo Itabira, no Quadrilátero Ferrífero, e Grão Pará, na Serra dos Carajás (Figura 1).

Figura 1 Diagrama esquemático da abundância de formação ferrífera ao longo do tempo geológico (modificado de Klein, 2005). O tempo decorre da direita para a esquerda, e os números mostram bilhões de anos (Ga) antes do presente. O eixo das ordenadas, não quantificado, representa uma estimativa subjetiva de abundância, relativa ao volume dos depósitos do Grupo Hamersley. A área em verde representa a idade dos litotipos do Complexo Granjeiro nos quais estão inseridas as formações ferríferas de Curral Novo do Piauí. A curva pontilhada em azul representa as proporções de oxigênio presente na atmosfera para os intervalos marcados no eixo da abscissa e a linha vermelha pontilhada representa as concentrações de oxigênio na atmosfera.

Formações ferríferas bandadas podem ser classificadas com base em sua composição mineralógica (James, 1954; James, 1966), ambiente tectônico (Gross, 1965) e ambiente deposicional (Kimberley, 1978; Simonson, 1985; Dasgupta *et al.*, 1999; Clout & Simonson, 2005). A variedade de sistemas de classificação existentes reflete a limitada compreensão a respeito da origem das formações ferríferas.

James (1954) separou as formações ferríferas em fácies óxido, silicato e carbonato. Na concepção daquele autor as diferentes composições mineralógicas corresponderiam geneticamente a diferentes profundidades de sedimentação. O fácies sulfeto foi introduzido por Fripp (1976) com base na presença de pirita e/ou pirrotita consideradas pelo autor como singenéticas. Mais tarde Phillips *et al.* (1984) e Groves *et al.* (1987) sugeriram que os sulfetos em formações ferríferas teriam origem epigenética a partir de remobilizações de sulfetos primários.

O fácies óxido típico consiste em litotipos bandados com alternância de leitos de hematita ($\text{Fe}_2^{3+} \text{O}_3$) com ou sem magnetita ($\text{Fe}^{2+} \text{Fe}_2^{3+} \text{O}_4$). Os principais óxidos de ferro presentes nessa fácies são magnetita, siderita ($\text{Fe}^{2+} \text{CO}_3$), além de silicatos de ferro (James, 1966). O fácies silicato é geralmente formado por greenalita, minnesotaita e stilpnomelano. Greenalita $[(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_6 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8]$ e minnesotaita $[(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_3 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2]$ são análogos

ricos em ferro da antigorita e talco respectivamente, enquanto o stilpnomelano $[K_{0.6}(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+})_6 Si_8 Al(O, OH)_{27} 2-4H_2O]$ é um complexo filossilicato. O fácies carbonato é constituído principalmente pelos carbonatos de ferro ankerita $[Ca Fe^{2+} (CO_3)_2]$ e siderita $[Fe^{2+}(CO_3)]$, ambos com grande variedade composicional. A mineralogia da fácies carbonato é relativamente simples com proporções semelhantes de *chert* e carbonatos de ferro. Para o fácies sulfeto, a mineralogia principal é constituída de sulfetos de ferro, principalmente piritas $(Fe^{2+}S_2)$ e pirrotitas $(Fe^{2+}S)$ disseminados predominantemente nos fácies óxido e silicato.

Baseando-se nas dimensões, associações litológicas e idades relacionadas a formações ferríferas, Gross (1965) classificou essas rochas em dois tipos: *Algoma-type* (tipo Algoma) e *Lake Superior-type* (tipo Lago Superior). O registro de formações ferríferas do tipo Algoma está predominantemente relacionado ao período Arqueano. Os fácies mais comuns são carbonato, silicato e sulfeto, com menor proporção da fácies óxido. Possuem extensões laterais da ordem de 10 km e espessura variando entre 10 e 100 m; ocorrem associados a rochas vulcânicas máficas e félsicas e a sedimentos clásticos e vulcanodásticos de leques submarinos (Cannon et al, 1995). O ambiente tectônico característico dessas formações induz bacias vulcanossedimentares tipo *greenstone belts*, arcos de ilha e bacias de *back arc* e *rifts* continentais intracratônicos (Gross, 1983).

O tipo Lago Superior representa extensas ocorrências de formações ferríferas bandadas associadas a rochas sedimentares clásticas e carbonáticas, com registro geológico predominante a partir do Paleoproterozóico. Neste tipo a composição mineralógica é constituída principalmente por óxidos de ferro. Apresentam grandes extensões em área, da ordem de 105 km² e grandes espessuras. A maioria dos autores interpreta um ambiente de deposição em plataformas marinhas rasas durante eventos de transgressão marinha (Trendall, 1973; Beukes, 1983; Simonson, 1985; Simonson & Hassler, 1996). O ambiente tectônico característico dessas formações é o de margens continentais passivas (Gross, 1965).

É de consenso geral que a maior concentração deste tipo de deposição situa-se entre unidades arqueanas e paleoproterozóicas, sem ocorrência após 1,8 G.a, com exceção dos depósitos do final do Neoproterozóico, geralmente associados a sucessões sedimentares com influência glacial. Essas ocorrências são mineralogicamente mais simples e consistem basicamente em hematita, sílica e, subordinadamente, carbonatos. Exemplos desta associação encontram-se no Grupo Rapitan, no noroeste canadense (Young, 1976), Grupo Umberatana na Austrália (Trendall, 1973), Supergrupo Damara na Namíbia (Beukes, 1973), Grupo Jacadigo no

Maciço de Urucum (Dorr II, 1945; Almeida, 1946) e Formação Puga no segmento sul da Serra da Bodoquena no Mato Grosso do Sul (Rampazzo, 2007; Piacentini, 2007).

Quando as estruturas sedimentares deposicionais não foram obliteradas por eventos metamórficos, as formações ferríferas podem ser subdivididas em formações ferríferas bandadas (BIFs) e formações ferríferas granulares, GIFs - *granular iron formations* (Clout & Simonson, 2005). As formações ferríferas granulares são formadas por sedimentos químicos arenosos geralmente bem selecionados, com texturas detríticas preservadas, e geralmente apresentam arcabouço constituído por clastos, matriz granular fina e cimento autigênico intersticial. Os BIFs - *Banded iron formations* por sua vez representam rochas finamente laminadas com alternâncias, geralmente rítmicas, entre minerais silicáticos, quartzo e/ou *chert* e óxidos de ferro.

Além de todas essas variedades de tipos e classificações de formações ferríferas, Hoffmann *et al.* (2004) propõem a denominação "*tectonic ironstone formation*", para formações ferríferas originadas por silicificação e enriquecimento de rochas sedimentares e vulcânicas a partir de fluidos hidrotermais ricos em ferro e enxofre, a partir da remobilização de fluidos em zonas de cisalhamento. Aqueles autores apresentam como modelo para esse tipo de formação ferrífera rochas ricas em ferro e sílica do *greenstone belt* de Belingwe em Zimbábue.

2.2 ORIGEM DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS

A origem das formações ferríferas bandadas representa um dos assuntos mais controversos e empolgantes no universo das geociências. Um grande número de conferências e simpósios regionais e internacionais teve como foco principal discussões sobre a origem e evolução das *banded iron formations* (BIFs).

Atualmente existem diferentes versões das duas hipóteses principais para a formação dos BIFs: a origem clástico-sedimentar e a vulcanogênica-sedimentar. Beukes & Gutzmer (2004) colocam como fatores principais para a gênese das formações ferríferas, independentemente da idade e do tipo, os seguintes processos: (i) alteração hidrotermal da crosta oceânica, que segundo os autores representa a principal fonte de ferro em oceanos profundos e ambiente anóxico; (ii) precipitação do ferro em resposta a processos de mistura

de massas d'água de fundos marinhos profundos, anóxicas e ricas em ferro, com massas d'água oxigenadas de plataformas marinhas rasas; (iii) precipitação de sílica na forma de *chert* em ambientes marinhos rasos, processo muito comum em oceanos pré-cambrianos. Além desses fatores, [Hoffmann et al. \(2004\)](#) sugerem o enriquecimento em ferro a partir de fluidos hidrotermais como um processo capaz de gerar formações ferríferas.

A hipótese dástico-sedimentar foi estudada em detalhe por vários pesquisadores. Em sua versão clássica sugere a origem das formações ferríferas bandadas a partir e do intemperismo e oxidação de rochas do continente e transporte de íons de Fe e Si na forma de colóides para os reservatórios (oceanos, mares, lagos, etc.), culminando com a deposição e precipitação de minerais ferrosos e *chert* nas porções mais distais dessas bacias ([Mel'nik, 1982](#)). Porém, para a diferenciação de partículas coloidais, é necessário à presença de ácidos orgânicos, o que levou [Martynenko \(1950\)](#) a levantar a hipótese da existência de plantas terrestres no Pré-cambriano, fato não comprovado até os dias de hoje. Este fato, juntamente com o avanço dos estudos sobre o comportamento físico-químico de partículas coloidais, levou [Govett \(1966\)](#) a concluir que as condições ambientais marinhas não seriam favoráveis para a acumulação primária do ferro, sendo bacias restritas como lagos, baías e/ou lagunas o ambiente ideal ([Hough, 1958](#)).

Para [Garrels et al. \(1973\)](#) as formações ferríferas bandadas teriam sua origem em corpos d'água com circulação restrita, porém com comunicação periódica com o oceano, em ambientes áridos com condições deposicionais evaporíticas. A deposição da sílica ocorreria em períodos secos, de maior evaporação. A deposição do ferro por sua vez, ocorreria em regimes físico-químicos mais complexos, em condições oxidantes (fácies óxido), evaporíticas (fácies sílica e carbonato) e redutoras (fácies sulfeto) semelhantes à distribuição espacial das fácies sedimentares proposta por [James \(1954\)](#) para as formações ferríferas bandadas.

[French \(1973\)](#) interpreta os BIFs como resultado da precipitação química em grandes bacias sedimentares, tectonicamente estáveis, análogas a grandes lagos evaporíticos, onde a alternância de leitos ricos em ferro e ricos em sílica estaria relacionada a sazonalidades: a alternância de ciclos climáticos influencia as condições físico-químicas dos fenômenos de intemperismo ([Trendall, 1972](#)). [Sakamoto \(1950\)](#) sugere que, em climas tropicais sujeitos a sistemas de monções, o ferro migra através de águas ácidas durante as estações chuvosas enquanto as águas alcalinas dos períodos de seca favorecem a migração da sílica. [Alexandrov \(1955\) apud Mel'nik \(1982\)](#), a partir de experimentos sobre a lixiviação do ferro e da sílica sugere, a alternância entre a deposição desses elementos como um produto de intemperismo

seletivo dos solos pré-cambrianos devido a variações sazonais da temperatura e do pH causado pela formação e decomposição da matéria orgânica. Dessa forma, soluções presentes nos solos removeriam a sílica durante as estações quentes, enquanto o ferro seria removido durante os períodos de inverno. Já [Kaukin \(1969\)](#) *apud* [Mel'nik \(1982\)](#) acredita que as variações sazonais do pH das soluções intempéricas dificilmente causariam a segregação entre a sílica e o ferro durante os processos de transporte e deposição. Para o autor esses elementos são transportados nas mesmas soluções e segregados no interior das bacias no curso da sedimentação.

As idéias expostas acima servem como base para suportar as teorias sobre a origem das formações ferríferas bandadas, genericamente classificadas como *Lake Superior type*, onde são praticamente ausentes rochas ígneas vulcânicas e/ou subvulcânicas. Nesse caso, a deposição do ferro é controlada pelo potencial de redox do ambiente sedimentar que, por sua vez, depende do conteúdo de oxigênio dissolvido na água, gerado principalmente por seres fotossintetizantes. A deposição da sílica, por sua vez, não depende da presença de oxigênio, podendo ocorrer continuamente, variando apenas na proporção em relação ao ferro e dependendo das flutuações do potencial redox. Assim a deposição desses elementos produzirá alternâncias entre bandas predominantemente ricas em hidróxidos de ferro e bandas ricas em sílica na forma de *chert* e/ou quartzo, com algumas impurezas na forma de óxidos de ferro.

As formações ferríferas relacionadas a depósitos sedimentares de origem glacial são geralmente interpretadas em relação a grandes eventos de glaciação do Neoproterozóico. De acordo com a hipótese *Snowball Earth* ([Hoffman et al., 1998](#)), os BIFs Neoproterozóicos surgiram em consequência do acúmulo de Fe dissolvido nos oceanos, isolado da atmosfera por espessa camada de gelo que recobriu a Terra. A precipitação das formações ferríferas, de acordo com o mencionado modelo, teria se dado após o degelo, com a mistura de águas ricas em Fe dissolvido com águas oxigenadas, provavelmente por meio de circulações oceânicas associadas a correntes ascendentes ([Kirschvink, 1992](#)).

A inexistência de ambientes modernos de formação de BIFs não associados a processos vulcanogênicos dificulta a formulação de modelos genéticos, de tal forma que não há consenso sobre os mecanismos de precipitação, gênese do bandamento, influência de processos biológicos, assim como a proveniência do ferro. O modelo clássico de interpretação dos mesmos por aumento do teor de oxigênio nos oceanos, devido à proliferação de organismos fotossintetizantes, formulado por [Cloud \(1973\)](#), tem sido questionado frente às recentes datações radiométricas dos depósitos Paleoproterozóicos, as quais demonstram que

os mesmos teriam sido depositados em amplo intervalo de tempo, por volta de 50 milhões de anos, e não de forma tão rápida, como admitido pelo referido modelo (Trendall, 2002).

Alternativamente, modelos de precipitação abiogênica (Trendall, 2002) têm sido formulados: a ausência de carbono orgânico nas formações ferríferas tem sido um argumento contrário à associação de atividade microbiana fotossintetizante a este tipo de deposição (Klein & Beukes, 1989). Há três condições básicas para o sítio deposicional de formação ferrífera: estabilidade tectônica por período de aproximadamente um milhão de anos, suficiente profundidade e geometria do corpo d'água que permita a livre circulação do ferro dissolvido, acrescida ainda da existência de fitoplâncton (Trendall, 2002).

A origem vulcanogênica-sedimentar também apresenta diferentes versões. As idéias mais difundidas dizem respeito à origem da sílica e do ferro a partir da atividade de fontes vulcânicas submarinas. Segundo Semenenko *et al.* (1967) *apud* Mel'nik (1982) as formações ferríferas podem se formar em ambientes vulcanogênicos onde soluções hidrotermais e emanções de gases submarinos seriam as fontes para formações ricas em sílica, ferro, manganês e sulfetos. Touchilin (1963) *apud* Mel'nik (1982) propõe a atividade de fumarolas submarinas como à principal fonte primária para a formação de depósitos de jaspilitos e formações ferríferas ricas em hematita e magnetita. Junto com silicatos de ferro e carbonatos, os óxidos de ferro podem ser formados em locais com altos valores de Eh da água. Assim, a sucessão de regimes de alternância entre o predomínio de O₂ ou CO₂ dissolvido na água produz o bandamento rítmico característico dessas rochas. Goodwin (1973) estudando as formações ferríferas do escudo canadense sugere a origem dessas rochas a partir da precipitação química em ambientes hidrotermais relacionados a vulcanismo submarino. Essa associação litológica é típica de sequências vulcanossedimentares tipo *greenstone belt* do período Arqueano.

Banerji (1977) estudando as formações ferríferas Neoarqueanas de Singhbhum, no oeste da Índia, conduziu que sua origem está relacionada a processos vulcano-exalativos ao longo de zonas de magmatismo fissural, onde íons de ferro e sílica foram carreados e depositados em alternância produzindo bandamento característico encontrados nessas rochas. Na região de Kiruna na Suécia, são conhecidas ocorrências de formações ferríferas associadas a apatitas (*apatite iron ore*), interpretadas inicialmente como de origem magmática, esses depósitos são atualmente relacionados a fontes vulcano-exalativas (Parak, 1975).

A participação de material vulcânico em formações ferríferas pode ser avaliada através da distribuição de elementos traços, em particular o germânio – Ge (Mel'nik 1982). Muitos autores (E. g. Fryer, 1983; Klein & Beukes, 1989; Gross, 1991) indicam dados isotópicos do sistema Sm-Nd e Elementos Terras Raras como consistentes com a derivação do ferro das formações ferríferas a partir de fontes vulcânicas.

Hagemann *et al* (1997) apresentam a evolução e avanços obtidos na prospecção de minério de ferro no intervalo de 1982 a 1997, com uma extensiva discussão a partir da revisão bibliográfica de diversos artigos acerca da evolução dos modelos genéticos de formações ferríferas e avanços nas estratégias exploratórias a partir da caracterização de zonas de falhas e alterações hidrotermais associadas como vetores na pesquisa de mineralizações de ferro de alto teor. Apresenta ainda os avanços obtidos neste período de 15 anos nos métodos geofísicos e sua aplicação a prospecção de ferro. Avanços no campo da geoquímica são também relatados, e com foco em inclusões fluídas, visando determinar condições de temperatura e salinidade das águas quando dos eventos mineralizantes. Discutem ainda são também discutidos tópicos de química mineral a partir da utilização das técnicas mais modernas disponíveis (E.g. ICPMS *microprobe/laser*), a utilização de isótopos de carbono e oxigênio, em carbonatos e óxidos, respectivamente, visando a identificação de características que permitam a comparação com outros jazimentos conhecidos e a delineação de modelos metalogenéticos mais precisos. Dois estudos de caso são apresentados um em Paraburdoo Ranges, no oeste Australiano na Província de Harmersley e outro estudo de caso no depósito C localizado a *ca.*100Km de Newman, no membro Mount Newman, na formação de Marra Mamba. No caso de Paraburdoo Ranges ressaltam a importância do controle estrutural das bacias do Proterozóico para a localização de depósitos de alto teor para a localidade e da mesma forma para o depósito C, no flanco norte do anticlinal de Weeli Wolli, a partir da utilização de técnicas de exploração para a caracterização de zonas de falhas, alterações nas vizinhanças de jazimentos de minério de ferro de alto teor com consequente definição de controles estruturais e vetores de alteração em relação aos corpos de minério de alto teor. Concluem que o fluxo de fluídos através de estruturas e processos hidrotermais é parte importante na transformação de BIFs (35%) em jazimentos de alto teor de ferro (>60%). E como consequência disto novos modelos genéticos estão em desenvolvimento, considerando origem dupla, hipogênica-supergênica, para origem dos BIFs no mundo.

Dias & Silva (2009) apresentam as mineralizações de ferro em Currais Novos do Piauí, no Estado do Piauí e levantam a hipótese a partir de dados de mapeamentos geológicos de detalhe, levantamentos de geologia estrutural e dados de petrografia em testemunhos de

sondagens de um modelo metalogenético do tipo IOCG com a presença de minérios de ferro do tipo Algoma associados. Sugerem que as rochas encaixantes imediatas da mineralização foram geradas a partir da ação de hidrotermalismo sobre protólito máfico (gabros/basaltos) e que aspectos texturais e paragêneses metamórficas indicam pico metamórfico em fácies anfibolito com evento hidrotermal sin a pós o evento metamórfico-deformacional. Indicam as principais paragêneses encontradas em lâminas petrográfica assim como as texturas e evidências em minerais registros da atuação de processos hidrotermais. Descrevem os principais tipos de formações ferríferas presentes na região do prospecto descrevendo as formações ferríferas associadas diretamente às rochas metavulcanossedimentes (Terreno Granjeiro) como do tipo Algoma e formações ferríferas de natureza metassomática, com magnetita disseminada, como “*ironstones*”. Finalizam os trabalhos sugerindo que as mineralizações de ferro com a presença de sulfetos estão relacionadas com a intrusão de granitóides Neoproterozóicos que ocorrem, dentro de um contexto regional, e usualmente estão associados a zonas de cisalhamento.

Em trabalhos posteriores [Costa \(2010\)](#) apresenta uma síntese dos trabalhos de geologia regional e local, a caracterização petrográfica do minério de ferro e suas encaixantes e a litogeoquímica das rochas encaixantes e do minério de ferro. Os dados de litogeoquímica apresentados trazem diagnósticos importantes acerca da metalogenia do minério de ferro, sugerindo um modelo misto hipogênico-supergênico para a geração do minério de ferro do distrito de Curral Novo.

Os dados obtidos por [Costa \(2010\)](#) indicam para a mineralização de ferro, primária, hipogênica, superficial, gerada a partir da precipitação de metais no antigo assoalho oceânico, nas porções proximais a depósitos vulcanogênicos são formações ferríferas do tipo Algoma e tem como padrão o empobrecimento em elementos terras raras leves (ETRL) e anomalias positivas de Európio (Eu) semelhante a padrões de outras formações ferríferas pré-cambrianas de fácies óxido (*E.g.* Quadrilátero Ferrífero). E que as mineralizações denominadas “*ironstones*”, supergênicas, geradas a partir da difusão de metais no depósito durante o metamorfismo com posterior concentração durante a evolução dos processos metamórficos foram geradas a partir da ação de fluídos hidrotermais no sistema, fato apresentado mostrando a partir de padrões de enriquecimento em elementos terras raras (ETR) e pela anomalia negativa de Cério.

2.3 GEOLOGIA LOCAL

A geologia do Alvo Massapé-Manga Velha está inserida no contexto do Complexo Granjeiro. De uma maneira geral, podemos subdividir essas rochas em dois domínios litológicos principais: a sucessão vulcanossedimentar e os domínios dos granitóides tonalito-trondhjemitó-granodioritos (TTG).

As formações ferríferas bandadas encontradas no Complexo Granjeiro foram descritas aqui com base em uma adaptação dos critérios propostos por [James \(1954\)](#), onde os fácies utilizados para descrever tais litotipos são meramente descritivos baseados principalmente em seu conteúdo mineralógico, semelhante ao conceito de fácies utilizado pela petrologia metamórfica. De uma maneira geral as formações ferríferas estudadas são compostas por formações ferríferas bandadas mistas (BIFs mistos) incluindo os fácies silicato, óxido e carbonato. Apesar da existência de sulfetos, estes ocorrem na forma de minerais acessórios, não configurando o fácies sulfeto geralmente encontradas em BIFs arqueanos. Apesar de na maioria das vezes não ser possível a separação dessas fácies, em alguns níveis, pode-se observar o predomínio de alguns minerais índices das fácies utilizadas. Este fato foi utilizado como critério para a descrição das três fácies principais encontradas, a seguir:

As formações ferríferas classificadas como pertencentes ao fácies silicato da localidade Massapé – Manga Velha são em geral bandadas, com biotita- granada – hornblenda – cummingtonita xistos com magnetita, hornblenda – cummingtonita xistos e biotita-hornblenda-cummingtonita xistos. Tem coloração cinza escuro esverdeado a negro e esbranquiçado quando há presença de carbonatos. Apresentam granulação fina a muito fina, ocasionalmente com porfiroblastos centimétricos de sulfetos, granadas e magnetita. O bandamento composicional parece estar preservado, na maioria das vezes. A textura geral dessas rochas é porfiroblástica com matriz- lepidonematoblástica a granonematoblástica. Os porfiroblastos são constituídos de cristais idióblásticos de magnetita, às vezes pirita e calcopirita bem formados, com tamanhos variando de 0,5 a 1,0 cm. Na maioria dos casos tais porfiroblastos são tardios. O bandamento dessas rochas é marcado pela alternância de níveis quartzosos e níveis ricos em silicatos de ferro, em sua maioria anfibólios (hornblenda, cummingtonita e actinolita) e níveis ricos em magnetita. A mineralogia desta rocha é essencialmente composta por anfibólios, magnetita, biotita e quartzo. Como acessórios ocorrem feldspato, granada, clorita, zircão, apatita, magnetita, pirrotita e calcopirita.

As formações ferríferas classificadas como pertencentes ao fácies óxido tem como característica marcante o alto conteúdo de magnetita, geralmente superior a 20%. Tais rochas apresentam coloração cinza a verde, com porções esbranquiçadas pela presença de carbonatos. Apresentam bandamento composicional, marcado pela alternância de níveis milimétricos ricos em quartzo e níveis ricos em óxidos e silicatos de ferro. O óxido de ferro encontrado nessas rochas é a magnetita, que ocorre na forma de grãos idióblásticos com até 1 mm e na forma de grãos xenoblásticos muito finos. A textura geral é granoblástica a nematogranoblástica, por vezes ocorrendo níveis com textura porfiroblástica com matriz granoblástica a nematogranoblástica. A mineralogia desses litotipos é composta essencialmente por magnetita, hornblenda, cummingtonita e quartzo. Como minerais acessórios ocorrem plagioclásio (oligoclásio), muscovita, apatita, epidoto, clorita, biotita, allanita, titanita, pirita e calcopirita. Essas rochas apresentam conteúdo de Fe da ordem de 30 a 40%, sendo o principal litotipo de interesse econômico da área estudada. Este litotipo é caracterizado pelo alto conteúdo de carbonatos cristalizados paralelos ao bandamento composicional. Esses litotipos apresentam coloração cinza esbranquiçado, granulação fina a muito fina. A estrutura predominante é bandada. A textura é granoblástica a nematogranoblástica. O bandamento dessas rochas é marcado pela alternância de níveis ricos em carbonato, quartzo, hornblenda e magnetita. O carbonato nessa fácies ocorre na forma de cristais subidioblásticos cristalizados em arranjos granoblásticos. Ocorrem cristais de epidoto, clorita, biotita, titanita, pirita e calcopirita.

Os principais litotipos que compõe as rochas metabásicas na região do alvo Massapê – Manga Velha são: anfibolitos; anfibolitos calciosilicáticos; anfibolitos bandados com granada na foliação; granada-anfibolitos; granada-carbonato anfibolitos; anfibolitos calciosilicáticos com granada; hornblenda-magnetita-biotita-calcixistos calciosilicáticos e hornblenda-cummingtonita - xistos com granadas e carbonato.

A geoquímica de elementos maiores realizada nas rochas metabásicas e xistos máficos intercalados na sequência de formações ferríferas bandadas, encontradas em sondagens rotativas executadas na área de trabalho, mostra que, quando comparadas com a composição de basaltos atuais, as rochas metabásicas da localidade Massapê-Manga Velha apresentam teores em SiO_2 , Na_2O , FeO e Fe_2O_3 relativamente elevados e teores de MgO baixos para rochas basálticas. Esse enriquecimento em SiO_2 , Na_2O , FeO e Fe_2O_3 e empobrecimento em MgO , provavelmente reflete os eventos metamórficos e/ou a intrusão de corpos graníticos brasileiros que podem ter afetado essas rochas (Ribeiro 1991). Para avaliar a composição mineralógica esperada para esses metabasaltos foi realizado o cálculo da composição

normativa (Norma CIPW). O cálculo da norma foi feito com base nos critérios propostos por [Cox et al. \(1979\)](#), com algumas modificações propostas em [Best \(2003\)](#). A norma CIPW, além de ser útil para o conhecimento da possível composição mineralógica dessas rochas, pode ser útil na distinção de basaltos toleíticos (saturados em sílica, com hiperstênio normativo) de basaltos alcalinos (insaturados em sílica, com nefelina normativa). Os metabasaltos de afinidade toleítica podem ser classificados como quartzotoleítos (supersaturados em sílica, com quartzo e hiperstênio normativos); e olivinatoleítos (com olivina e hiperstênio normativos). Duas amostras apresentaram nefelina normativa, indicando a presença de basaltos alcalinos. Quando plotadas em diagramas discriminatórios AFM ([Irvine & Baragar, 1971](#)) podem ser classificadas como predominantemente equivalentes a basaltos de caráter toleíticos. Para comparar os resultados observados no diagrama AFM, os valores de SiO_2 x Ferro total foram confrontados em diagrama binário e corroborando o caráter toleítico dessas rochas. Os teores de álcalis totais ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) x SiO_2 plotados no diagrama binário TAS de [Le Bas et al. \(1986\)](#), permitem classificar as amostras como predominantemente basaltos. [Shervais \(1982\)](#) propôs o diagrama V versus Ti para discriminar os diferentes ambientes tectônicos de ocorrências de basaltos. Quando plotados nesse diagrama (**Figura 2**), podemos classificar os metabasaltos encontrados como do tipo MORB (*mid ocean ridge basalt*) de suítes de baixo TiO_2 (< 2.0%).

Figura 2 - A) Diagrama discriminatório AFM; B) Diagrama SiO₂ x Ferro Total; C) Diagrama TAS e D) Diagrama V x Ti.

Portanto os metabasitos associados às formações ferríferas bandadas do Complexo Granjeiro apresentam afinidades geoquímicas semelhantes a rochas basálticas toleíticas de fundo oceânico. E corroboram a classificação dessas formações como do tipo Algoma, associadas a processos vulcanogênicos arqueanos.

É importante lembrar que, juntamente com os litotipos descritos acima, ocorrem granitóides de composição monzonítica a sienogranítica, com relações de contato não determinadas. É possível que estas rochas representem intrusões tardias, deformadas e paralelizadas durante o último evento metamórfico-deformacional. Outra possibilidade é que representem fases finais dos processos de multi-intrusões relacionados às associações TTG.

3.0 IDENTIFICAÇÃO DE ASSINATURAS GEOFÍSICAS DE AMBIENTES DE OCORRÊNCIA DE FORMAÇÕES FERRÍFERAS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS.

RESUMO

A indicação de ambientes geológicos com maior possibilidade de ocorrência de mineralizações por meio de métodos indiretos é uma necessidade da indústria da mineração. Buscando eficiência não raro os métodos abarcam uma grande gama de variáveis na sua execução, tornando-os complexos e extravagantes do ponto de vista geológico e computacional. A utilização em conjunto de métodos radiométricos e magnetométricos, em especial a combinação dos resultados do canal da contagem total com o sinal analítico, pode ser uma importante alternativa para inferir ambientes geológicos propícios a ocorrências de formações ferríferas à magnetita, especialmente nos casos onde as rochas encaixantes apresentam contraste em relação às rochas mineralizadas. Aplicando uma análise por principais componentes (APC) sobre dados radiométricos no estudo das mineralizações ferríferas da região de Curral Novo do Piauí, PI, obteve-se uma correlação linear de 0,99 entre a componente principal 1 e o canal radiométrico da contagem total. Esta concentração de informação pela redução de dimensionalidade mostra que a APC faz sua função ao explicar, em uma componente principal, um conjunto de variáveis. Com isso pode-se identificar, naquele ambiente geológico, assinaturas particulares de zonas mais propícias à ocorrência de formações ferríferas com base nos dados de contagem total e do sinal analítico.

Palavras-chave: Formações ferríferas, gamaespectrometria, magnetometria, geofísica, análise por componentes principais.

ABSTRACT

The indication of geological environments with greater possibility of mineralization through indirect methods is a necessity in the mining industry. In search of efficiency methods, often covering a wide range of variables in its implementation can make them geological and computationally complex and extravagant. The use of radiometric and magnetometric methods, in particular the combined use of total count with the analytic signal, can be an important alternative to infer the geological environments conducive to the occurrence of magnetite iron formations, especially in cases where the rocks exhibit contrast to the mineralized rocks. Applying a principal components analysis (PCA) on radiometric data in the study of iron mineralization at the region of Curral Novo do Piauí, Piauí State, we obtained a linear correlation of 0.99 between the first principal component and the radiometric total count channel. This concentration of information by the dimensionality reduction shows that the APC may explain, in a single component, a set of variables apparently independent, identifying the geological environment more conducive to the occurrence of iron formations.

Keywords: Iron formations, gamaspectrometry, magnetometry, geophysics, principal component analysis.

INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas de processamento digital de imagens obtidas a partir de dados geofísicos pode ser uma poderosa ferramenta de exploração mineral quando processos de mineralização primários e secundários resultam na formação de anomalias nos canais gamaespectrométricos. Estudos realizados a partir de dados aerogamaespectrométricos podem trazer informações valiosas, com perspectivas que não estariam disponíveis nos métodos tradicionais de análise. A utilização de técnicas de estatísticas multivariadas, em especial a análise por componentes principais (APC), podem possibilitar um melhor entendimento da geologia, principalmente quando apoiados em levantamentos geofísicos de semi-detalhe.

Apoiado nesta proposição, os dados de gamaespectrometria e magnetometria dos depósitos de ferro da região de Curral Novo do Piauí, obtidos através de levantamento aéreo realizado pela BEMISA – Brasil Exploração Mineral S.A., foram reprocessados utilizando-se a análise por componentes principais, com o objetivo de delinear padrões geofísicos característicos, capazes de sugerir a ocorrência de mineralizações ferríferas na região.

Localizada na porção sudeste do estado do Piauí (PI), a área de estudo engloba os municípios de Curral Novo do Piauí e Simões na localidade denominada Massapê - Manga Velha (**Figura 1**).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo localidade de Massapê - Manga Velha (área de trabalho).

O Complexo Granjeiro, composto por rochas de caráter gnáissico migmatítico e rochas metavulcanossedimentares associadas, é o substrato rochoso da região. Não há um quadro claro da geologia e da associação com os diversos tipos de mineralizações que lá ocorrem. Mapeamentos geológicos existentes para a região são apresentados em escalas 1:100.000 e são raros trabalhos de integração, envolvendo geologia e a assinatura geofísica destas rochas. Em função da escala dos dados geológicos locais foi feito o mapeamento geológico da área de estudo, com caminhamentos de direção SE-NW, medida de atitudes e coleta de amostras. A petrografia foi feita tanto em microscópios de luz transmitida como de luz refletida do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

A geofísica, em conjunto com técnicas de processamento digital de imagens para estudos relacionados às principais ocorrências minerais, poderá trazer um quadro mais preciso dos tipos de ocorrências minerais associados aos terrenos do Complexo Granjeiro e das regiões adjacentes, notadamente as ocorrências de formações ferríferas. Para os tipos de rochas que ocorrem na região, o uso de técnicas no tratamento de dados gamaespectrométricos permite identificar regiões anômalas baseadas em assinaturas nos canais U, Th, K e na magnetometria, permitindo assim à identificação de assinaturas características de ambientes geológicos propícios a ocorrência de formações ferríferas e eventualmente a identificação de novas áreas com potencial prospectivo.

Levantamentos aerogeofísicos

A aeronave utilizada para a realização do levantamento foi uma *Caravan Aircraft*, e a instalação da instrumentação geofísica ficou a cargo da Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda.

O levantamento aerogeofísico foi realizado a partir de sobrevôo com altura nominal de voo de 100 m e velocidade média de 280 km/h com linhas espaçadas de 300 em 300 m e 3.000 m entre as *tie lines*, com amostragens no magnetômetro a cada 0,1 s e nos canais radiométricos a cada segundo. Em termos de espaço o sobrevôo com essas características possibilitou leituras do magnetômetro a cada 8-10 m sobre as linhas sobrevoadas. No total foram levantados 4.291,55 Km/lineares em direção Norte-Sul com as *tie lines* com direção Leste-Oeste. Foi utilizado um magnetômetro Geometrics G-822A, com sensibilidade de 0,003 nT, no intervalo de 20.000 a 100.000 nT, e ruído no sensor menor que 0,02 nT. Os dados

coletados pelo magnetômetro tiveram a correção de *lag*, variação diurna e foram nivelados e micronivelados e posteriormente corrigidos pelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) a partir do modelo IGRF 2005 recalculado para a data do levantamento (Microsurvey, 2009).

O espectrômetro RSX 500 é uma das ferramentas mais avançadas atualmente para utilização em exploração geofísica, com captação dos sinais radiométricos em 1.024 canais. Nos dados radiométricos foram realizadas correções de *lag*, correção de tempo morto, processos de filtragem, remoção de vôo e *background* cósmico, remoção de *background* de radônio e estimativa do coeficiente *Skyshine*, remoção do efeito Compton, correção de altitude e posteriormente foram convertidos em concentração de radioelementos e micronivelados (Microsurvey, 2009). O sobrevôo foi entregue em projeção UTM local na zona 24 Sul, com *datum* SAD 69 e elipsoide de referência GRS 1967 e em função da resolução do levantamento a escala dos trabalhos é de 1:30.000.

GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Zona Transversal Província Borborema, que equivale à Região de Dobramentos Nordeste de Brito Neves (1975). Constitui um domínio de intensa complexidade litoestrutural e de longa história crustal, onde são bastante evidentes os efeitos dos eventos tectônicos, termais e magmáticos do Cído Brasileiro, ressaltando a sua evolução policíclica (Santos & Brito Neves, 1984). Alcançam maiores expressões na Província os terrenos pré-cambrianos, em especial: o embasamento retrabalhado nos eventos Transamazônico e Brasileiro; as supracrustais do Proterozóico e expressivas ocorrências de suítes graníticas Neoproterozóicas além da Cobertura Sedimentar do Fanerozóico (Ribeiro & Vasconcelos, 1991). O domínio mais antigo, de idade arqueana, é formado por rochas do Complexo Gnaíssico-Migmatítico e rochas plutônicas associadas, articulando com associações tonalito-trondhjemito-granodioritos (TTG) e supracrustais metavulcanossedimentares o denominado Complexo Granjeiro por Bizzi *et al.* (2001). No que diz respeito à geocronologia, os dados disponíveis permitem o seu enquadramento no Neoarqueano a Paleoproterozóico (Brito Neves *et al.* 1982). As supracrustais compreendem os metapelitos e metapsamitos, com considerável contribuição vulcânica, do Grupo Cachoeirinha. Os litotipos mais característicos são os clorita xistos, sericita-dorita xistos e albita-dorita xistos.

Esta unidade é considerada de idade Mesoproterozóica por correlação com outras supracrustais da região. Um expressivo conjunto de granitóides Neoproterozóicos de combinação variável entre granodioritos, monzonitos, quartzo-sieno granitos e álcali-sieno granitos completam o arcabouço pré-cambriano da região. As coberturas sedimentares fanerozóicas são representadas por sedimentos Cretácicos da Bacia do Araripe, das Formações Santana, caracterizada pela associação de fácies silicidásticas, evaporíticas e carbonáticas, e Exu, formada essencialmente por arenitos.

As formações ferríferas da localidade denominada Massapê-Manga Velha e demais ocorrências de ferro cadastradas nos arredores deste alvo mostram, como traço comum, a sua associação com componentes líticos do Complexo Granjeiro. De acordo com Santos (1996), o Complexo Granjeiro encerra duas associações litoestratigráficas diacrônicas, com o seguinte arranjo e particularidades: um conjunto mais antigo de rochas supracrustais, composto por metamáficas anfibolitizadas, tufos máficos e félsicos xistificados, *metacherts*, formações ferríferas, paragnaisses, calcissilicáticas, quartzitos e xistos paraderivados; presença de componentes vulcanossedimentares e indusão de horizontes químico-exalativos apontando para processos desenvolvidos em ambiente de crosta oceânica e uma unidade constituída por ortognaisses granodioríticos a tonalíticos com idade U-Pb SHRIMP 2,54 Ga (Silva *et al.* 1997) com evidências de intrusão e/ou assimilação das supracrustais em questão, atestando o caráter plutônico desses ortognaisses.

Estas interpretações relacionadas às supracrustais e aos ortognaisses, combinadas com idades modelo TDM obtidas nestas rochas no intervalo 2,65-2,55Ga, sugerem que o Complexo Granjeiro representa um remanescente arqueano de um sistema do tipo bacia oceânica-arco magmático.

Geologia local

A geologia da área de estudo está inserida no contexto do Complexo Granjeiro que, de maneira geral, pode ser subdividido em dois domínios litológicos principais: a sucessão vulcanossedimentar e os domínios dos granitóides TTG (**Figura 2**).

Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo com localização dos perfis amostrados.

Os granitóides e gnaisses migmatíticos de associação TTG representam as rochas mais antigas da região. Na área estudada essa associação litológica é representada por Biotita (Bt)- gnaisses monzoníticos, Muscovita (Ms)- Bt granodioritos, gnaisses tonalíticos e Ms -Bt gnaisses. Essas rochas apresentam textura predominante granoblástica a lepidogranoblástica, por vezes porfiroblásticas. Em muitos locais a textura é milonítica, marcada pela forte alongação de cristais de quartzo e feldspato. A foliação nestes casos é marcada pela isorientação de minerais máficos, principalmente homblenda e biotita e por fitas de quartzo-feldspato (*ribbons*). Nos termos menos deformados a foliação mostra-se marcada pela orientação principalmente da biotita. Em muitos casos ocorrem feições reliquias indicativas de processos de migmatização dessas rochas, tais como: leucossoma, mesossoma e

melanossoma, ambos transpostos pela foliação milonítica. A mineralogia dessas rochas é formada por quartzo, feldspato alcalino, oligoclásio (An₁₄₋₁₅), hornblenda e biotita. Como acessórios ocorrem apatita, titanita, zircão, clorita, muscovita, magnetita e monazita.

As formações ferríferas bandadas encontradas no Complexo Granjeiro foram descritas aqui com base na adaptação dos critérios propostos por [James \(1954\)](#), onde o termo fácies utilizado para descrever tais litotipos tem significado meramente descritivo, baseado principalmente em seu conteúdo mineralógico, semelhante ao conceito de fácies utilizado pela petrologia metamórfica. De maneira geral os litotipos estudados são compostos por formações ferríferas bandadas mistas (*Banded Iron Formations* mistos – BIFs mistos), incluindo os fácies silicato, óxido e carbonato. Apesar da existência de sulfetos, estes ocorrem na forma de minerais acessórios, não configurando o fácies sulfeto geralmente encontrado em BIFs arqueanos. Apesar de, na maioria das vezes, não ser possível a separação desses fácies, em alguns níveis pode-se observar o predomínio de alguns minerais índices, o que foi utilizado como critério para a descrição dos principais fácies encontrados.

As formações ferríferas classificadas como pertencentes ao fácies silicato da localidade Massapé – Manga Velha são em geral laminadas a xistosas, com bt-granada (grt)-hornblenda (hbl)-cummingtonita (cum) xistos com magnetita, hbl- cum xistos e bt-hbl- cum xistos. Tem coloração cinza escuro esverdeado a negro e esbranquiçado quando há presença de carbonatos. Apresentam granulação fina a muito fina, ocasionalmente com porfiroblastos centimétricos de sulfetos, granadas e magnetita. O bandamento composicional está preservado na maioria das vezes. A textura geral dessas rochas é porfiroblástica com matriz lepidonematoblástica a granonematoblástica. Os porfiroblastos são constituídos de cristais idioblásticos de magnetita, às vezes pirita e calcopirita bem formados, com tamanhos variando de 0,5 a 1,0 cm. Na maioria dos casos tais porfiroblastos são tardios. O bandamento dessas rochas é marcado pela alternância de níveis quartzosos e níveis ricos em silicatos de ferro, em sua maioria anfibólios (hornblenda, cummingtonita e actinolita), e raros níveis ricos em magnetita. A mineralogia desta rocha é essencialmente composta por anfibólios, magnetita, biotita e quartzo. Como acessórios ocorrem feldspato, granada, clorita, zircão, apatita, magnetita, pirrotita e calcopirita.

As formações ferríferas, classificadas como pertencentes ao fácies óxido, tem como característica marcante o alto conteúdo de magnetita, geralmente superior a 20%. Apresentam bandamento composicional, marcado pela alternância de níveis milimétricos de cor clara, ricos em quartzo e níveis ricos em óxidos e silicatos de ferro de coloração cinza a

verde. O óxido de ferro encontrado nessas rochas é a magnetita, ocorrendo na forma de grãos idioblásticos com até 1 mm e na forma de grãos xenoblásticos muito finos. A textura geral é granoblástica a nematogranoblástica com níveis de textura porfiroblástica com matriz granoblástica a nematogranoblástica. A mineralogia desses litotipos é composta essencialmente por magnetita, hornblenda, cummingtonita e quartzo. Como minerais acessórios ocorrem plagioclásio (oligoclásio), muscovita, apatita, epidoto, clorita, biotita, allanita, titanita, pirita e calcopirita. Essas rochas apresentam conteúdo de Fe da ordem de 30 a 40%, sendo o principal litotipo de interesse econômico da área estudada.

O fácies carbonato é caracterizado pelo alto conteúdo de carbonatos cristalizados paralelamente ao bandamento composicional. Esses litotipos apresentam coloração cinza esbranquiçado, granulação fina a muito fina. A estrutura predominante é bandada e a textura granoblástica a nematogranoblástica. O bandamento dessas rochas é marcado pela alternância de níveis ricos em carbonato, quartzo, hornblenda e magnetita. O carbonato nesse fácies ocorre na forma de cristais subidioblásticos cristalizados em arranjos granoblásticos. Ocorrem cristais de epidoto, clorita, biotita, titanita, pirita e calcopirita.

Rochas metabásicas são encontradas com variações intermediárias a partir de dois litotipos principais: Grt-bt-hbl anfibolitos, Grt-bt-cum anfibolitos. A textura dessas rochas varia entre termos granonematoblásticos, lepidonematoblásticos e nematoblásticos. A foliação é marcada pela isorientação de cristais de anfibólio, alongados paralelamente segundo a direção do traço da estrutura. A mineralogia destas rochas é formada por hornblenda, cummingtonita, quartzo, biotita, granada e carbonatos. Como acessórios foram encontrados titanita, epidoto, oligoclásio (An₂₆₋₂₇), zircão, clorita, apatita. Para os opacos foram descritos magnetita, ilmenita, pirita e calcopirita. As determinações dos teores de anortita nos cristais de plagioclásio foram prejudicadas pelo mau desenvolvimento e irregularidades da geminação polissintética característica desse mineral. A classificação dos protólitos é relativamente insegura devido a intensas transformações mineralógico-texturais ocorridas durante evento(s) metamórfico(s).

É importante lembrar que, juntamente com os litotipos descritos acima, ocorrem granitóides de composição monzonítica a sienogranítica, com relações de contato não determinadas. É possível que estas rochas representem intrusões tardias deformadas e paralelizadas durante o último evento metamórfico-deformacional. Outra possibilidade é que representem fases finais dos processos de multi-intrusões relacionados às associações TTG.

Análise por componentes principais

A análise por componentes principais (APC) é um método que pode auxiliar na identificação de padrões de comportamento simples em um complexo grupo de variáveis. Particularmente, esse método demonstra se as variáveis podem ser genericamente ou integralmente explicadas em termos de um número menor de fatores chamados principais componentes (PCs). É uma abordagem estatístico-matemática que pode ser usada para analisar interações entre um grande número de variáveis e explicar essas variáveis em termos de dimensões inerentes (fatores/componentes principais) (Hair *et al*, 2005) e verificar se as variáveis podem ser genérica ou inteiramente explicadas em termos de um número menor de variáveis denominadas fatores.

As PCs são, segundo Davis (1986), os autovetores de uma matriz de correlação, e podem fornecer um *insight* da estrutura da matriz. Uma síntese dos processos envolvidos nos trabalhos com análise por principais componentes é apresentada na **Figura 3**.

Figura 3 - Fluxo do processamento dos dados na utilização da APC.

Em exploração mineral a utilização mais comum desse método multivariado de análise é usada na caracterização e mapeamento das inter-relações entre um grande número de dados (*E.g.* geoquímica de superfície)([Geosoft, 2008](#)). Grandes volumes de dados são um problema crescente, tendo em vista o acúmulo de informações nos bancos de dados com grande número de variáveis. Com o objetivo de simplificar o processamento e análise de grandes conjuntos de dados, houve um renovado interesse nas técnicas de análises via principais componentes e sua respectiva forma de apresentação, requerendo de geólogos de exploração competências para desenvolver trabalhos a partir da utilização destas técnicas. Diversos usos estatístico-matemáticos vêm sendo desenvolvidos e aplicados aos mais diversos tipos de dados. É importante ressaltar que a análise por principais componentes pertence à categoria de técnicas, nas quais a utilidade é julgada pelo desempenho e não por considerações teóricas ([Davis, 1986](#)).

[Davis \(1986\)](#) apresenta uma gama de exemplos a partir da utilização de matrizes de correlação (modo Q) e variância-covariância (modo R), com a utilização dos modos Q ou R e Q e R simultaneamente. Compara metodologias ressaltando que a utilização de um ou outro modo (Q e R) produz resultados diferentes na avaliação de um conjunto de dados, pois a variabilidade avaliada no modo Q é a variabilidade entre amostras enquanto a variabilidade avaliada pelo modo R é a variabilidade entre variáveis. De forma sintética, o modo R(*R mode*) examina as correlações ou covariâncias entre as variáveis enquanto o modo Q(*Q mode*) tem seu foco nas correlações ou covariâncias entre amostras. Como a matriz $[M]$ originada pelo “R mode” não é idêntica à matriz $[M]$ originada pelo “Q mode”, tal diferença entre escalas não fornece os mesmos resultados apesar de serem equivalentes, fato que segundo [Davis \(1986\)](#) escapa à maioria dos investigadores. O “Q mode” foi desenvolvido levando à criação de procedimentos extremamente pesados e computacionalmente extravagantes ([Davis, 1986](#)). Na análise por componentes principais pelo “Q mode” a normalização dos dados e sua divisão por cada elemento de $[X]$ pela raiz quadrada da soma dos quadrados das linhas, também produz a matriz escalar $[W]$. Enquanto a no “R mode” a solução fatorial inicia-se pela matriz simétrica dos menores produtos $[W]'[W]$, enquanto no “Q mode” a solução inicia-se pela matriz simétrica dos maiores produtos $[W][W]'$ ([Davis 1986](#)). Isso significa também que os procedimentos de escalonamento de valores não são os mesmos para originar $[W]$ a partir dos dados originais $[X]$. Por exemplo, na análise das componentes principais cada elemento de $[X]$ é dividido pelo desvio padrão das colunas para produzir $[W]$.

O problema a ser solucionado pelo método das principais componentes visa encontrar o sistema de eixos que melhor se ajusta à nuvem de pontos, permitindo diminuir a

dimensionalidade do espaço de atributos com perda mínima de informação. Genericamente a análise por principais componentes envolve a transformação de cada elemento de uma matriz $[X]$ pela divisão do desvio padrão das colunas, produzindo uma matriz escalar $[W]$. E compreende uma série de procedimentos matemáticos estatísticos iniciados a partir da transformação de uma matriz inicial de dados em uma matriz de dados normalizados de amostras nas linhas e as variáveis descritas nas colunas da respectiva matriz. A partir da matriz de dados transformados é gerada uma matriz de correlação entre as variáveis normalizadas, a qual servirá de base para geração dos autovetores e autovalores que irão descrever as principais propriedades das variáveis. O processo de cálculo das principais componentes envolve a resolução de sistemas de equações lineares para a obtenção dos autovalores e autovetores.

Autovetores são operadores lineares que necessariamente são multiplicados por um escalar (λ /autovalores) real e maior que zero e que são usualmente denominados autovalores. Os autovalores são números reais associados aos autovetores e representam a magnitude ou o comprimento dos eixos das principais componentes (Davis, 1986). Segundo Davis (1986), a conversão da matriz de dados normalizados, ou unidades autovetores, em PCs não afeta a direção dos vetores, ou seus comprimentos. Isto é feito pela multiplicação de cada elemento numa matriz normalizada pelo valor correspondente ou raiz quadrada do autovalor correspondente. A componente principal resultante é um valor que é ponderado proporcionalmente pela correlação que ele representa, em relação às variáveis.

Os procedimentos para obtenção das principais componentes envolvem a multiplicação de uma matriz, à esquerda de um vetor, e trará como resposta um vetor que é transformado da sua posição original. É da natureza da transformação que os autovetores apareçam. Autovetores só podem ser encontrados em matrizes quadradas e Davis (1986) sugere que ao encontrar autovetores os mesmos devem ter comprimento exato de um, procedimento este que é a razão da normalização do conjunto de dados. Outra razão apresentada é em relação ao comprimento de um vetor que não será afetado se for realmente um autovetor enquanto a direção irá afetar as propriedades do autovetor. Assim, a fim de manter autovetores com um padrão, e sempre que encontrar um autovetor, é prática escaloná-lo para um comprimento de 1, visando que todos os autovetores tenham comprimento máximo de 1. Para a utilização da análise por principais componentes, neste trabalho, alguns cânones foram assumidos de forma a garantir a qualidade na interpretação e análise dos dados de forma que em todo o *set* de dados utilizados são referentes à mesma população e assumiu-se que todas as variáveis são normalmente distribuídas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o início dos trabalhos foram compiladas as folhas geológicas da CPRM denominadas Patos (Scheid & Ferreira, 1991), Simões (Ribeiro & Vasconcelos, 1991), Santa Filomena (Angelim, 1988), Paulistana (Gomes & Vasconcelos, 1991) e Afrânio (Sampaio, 1991), originalmente em escala 1:100.000, estes arquivos originalmente em papel foram escaneados, digitalizados em formato *shapefile* e posteriormente integrados em banco de dados compondo a base geológica utilizada durante os trabalhos. As cartas compiladas em escala 1: 100.000 e seus respectivos bancos de dados serviram para o balizamento dos estudos dos padrões gamaespectrométricos por unidades geológicas.

Os dados utilizados neste estudo foram analisados separadamente, de modo que os de gamaespectrometria foram sistematicamente tratados de forma independente, via APC, dos dados aeromagnéticos, também levantados no sobrevôo aerogeofísico na área de estudo. Adotou-se este princípio principalmente em virtude de se tratarem de dados oriundos de diferentes fontes, mensurando grandezas físicas distintas: radiação gama emitida por rochas e minerais e fluxos de corrente magnética.

Os dados utilizados correspondem a um banco de dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos de levantamento realizado para o projeto da BEMISA – Brasil Exploração Mineral S.A. denominado Planalto Piauí, sobre os municípios de Simões, Curral Novo do Piauí, Aripina e Betânia do Piauí, em levantamento complementado em Janeiro de 2009 (Microsurvey, 2009). São 51.332 pontos, do levantamento gamaespectrométricos, onde foram amostrados, via levantamento aerogeofísico, dados nos canais gamaespectrométricos das janelas do contagem total, K, eTh e eU. O banco de dados, aerogamaespectrométricos avaliado, assim, corresponde a um *set* originalmente com 4 variáveis. Os dados aeromagnéticos no banco de dados utilizado são resultado da reamostragem do banco de dados magnetométrico original, de número de amostragens superior a dos dados radiométricos em função do equipamento utilizado.

Os dados de aeromagnetometria foram utilizados para comparação com os resultados oriundos dos dados radiométricos e correlacionados com a geologia, buscando um prognóstico de possíveis anomalias relacionadas à mineralizações na área.

Foram utilizadas técnicas estatísticas multivariadas (*i.e.* Análise de Principais Componentes) para avaliar inter-relações entre as variáveis e explicar essas variáveis em

termos de dimensões inerentes, objetivando condensar a informação contida nas variáveis originais (K, eTh e eU) num conjunto menor de variáveis estatísticas com mínima perda de informação, contando com a possibilidade de identificar combinações lógicas de variáveis e entendimento de suas interações.

Dados do mapeamento geológico exploratório foram utilizados visando guiar a caracterização das assinaturas geofísicas de modo que a ambiência geológica de ocorrência das formações ferríferas pudesse ser determinada a partir do cruzamento da contagem total e do sinal analítico. Dados de sondagens, de descrição de rochas e petrografia prestaram apoio na correlação dos sinais com os tipos de rochas encontrados em sub-superfície. Desta forma a partir da caracterização das rochas em superfície e sub-superfície foi possível caracterizar a assinatura geofísica das formações ferríferas em termos dos métodos radiométricos (contagem total) e magnetométricos (sinal analítico).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Trabalhos de mapeamento geológico de cunho exploratório executado por técnicos da BEMISA apresentaram com resultado a delineação de 46 corpos mineralizados em ferro, arrançados ao longo de expressiva zona de cisalhamento de caráter dextral, sintética com *trend* e de azimuth 60º, entre as localidades de Serra Vermelha a sudoeste e Monte Santo a nordeste na região (Dias, 2008). Trabalhos geológicos de detalhe integrados com levantamento magnético aéreo consolidaram, na área objeto deste trabalho, três segmentos ou depósitos de maior importância entre as localidades do Massapê e Manga Velha. Apesar do contexto sub-regional composto predominantemente por rochas de composição ácida (gnaisse graníticos e sienogranitos) os corpos de formação ferrífera distribuídos ao longo deste *site*, estão encaixados ou associados a rochas metabásicas anfibolitizadas e biotitizadas, pelo efeito de metamorfismo, articuladas com domínios ácidos de amplo espectro territorial. Portanto, é previsível um forte contraste de propriedades magnéticas e radiométricas traduzidas no levantamento geofísico utilizado neste trabalho.

Rochas básicas e rochas ácidas apresentam comportamento oposto e bem distinto quando analisados os canais radiométricos (U, Th ou K) e mesmo o canal da contagem total, permitindo separar com precisão domínios litológicos de rochas ácidas de domínios com predomínio de rochas básicas. Isto se deve ao fato das rochas ácidas normalmente conterem

maior quantidade de minerais portadores de elementos radioativos em relação a rochas básicas. Este padrão identificado na localidade e já verificado em outros casos (*E.g.* Blum, 1999; 2001) para os canais gamaespectrométricos onde, principalmente em imagens ternárias, a separação de rochas ácidas de rochas básicas pode ser realizada a partir da delimitação de áreas com e sem conteúdo de minerais. Considerando que as encaixantes imediatas das mineralizações são rochas básicas, o método foi utilizado para delimitação dos ambientes geológicos com a presença de rochas metabásicas. Isto associado a zonas com altos valores para o sinal analítico possibilitou delinear o limiar das ambiências geológicas com maior propensão à ocorrência de formações ferríferas à magnetita.

Basicamente foram aplicados conhecimentos das propriedades físicas das rochas (susceptibilidade magnética e propriedades radiométricas) para delimitação das ambiências de maior favorabilidade a partir do estudo dos canais radiométricos e das transformadas do campo magnético total. Sobre as premissas iniciais de que (a) rochas básicas proporcionam baixos tanto no canal da contagem total como na primeira principal componente de APC sobre as variáveis originais (K, eTh e eU); (b) rochas ácidas formam altos nos canais radiométricos e (c) que as rochas de maior susceptibilidade magnética transmitem um fluxo maior de energia eletromagnética que rochas de menor susceptibilidade magnética, foi desenhada a estratégia para a confecção dos perfis.

Assim, a partir da sobreposição dos perfis da anomalia do sinal analítico e da contagem total foi possível a delimitação dos limiares das ambiências geológicas mais favoráveis à ocorrência de formações ferríferas.

A conjugação das duas variáveis com a geologia pode ser observada na **Figura 4** a seguir:

Figura 4 - Perfis dos canais da contagem total e anomalia do sinal analíticos sobrepostos à geologia indicando a ambiência de ocorrência das formações ferríferas.

Em relação à aplicação de APCs, os estudos foram realizados visando identificar a PC que concentraria a maior quantidade de informação, verificando-se posteriormente suas cargas para identificação das variáveis que atuavam nos dados conferindo maior peso relativo em cada uma das componentes. O estudo das PCs se inicia a partir da definição do critério do

autovalor, através do teste de *Scree*, que indica que qualquer componente individual analisada deverá explicar ao menos uma variável e apenas as componentes que possuem autovalores maiores que 1 são consideradas significantes. Com base neste critério é possível afirmar que apenas a 1ª Principal Componente, por apresentar valores maiores que 1, explica o conjunto das quatro variáveis (**Figura 5**).

O Teste de *Scree* é realizado com o objetivo de identificar o número de componentes que podem ser extraídos antes que um valor único de variância comece a dominar a estrutura comum ([Hair et al 2005](#)). O Teste de *Scree* é determinado a partir do gráfico de autovalores em relação ao número de componentes em sua ordem de extração. A forma da curva resultante é utilizada para avaliar o ponto de corte. A seleção do número de componentes é interrelacionada com uma avaliação da estrutura, a qual é revelada na fase de interpretação. Se poucas componentes são selecionadas, a estrutura correta não é revelada e dimensões podem vir a serem omitidas. O ponto no qual o gráfico começa a ficar horizontal é indicativo do número máximo de fatores a serem extraídos.

Os autovalores e, conseqüentemente, as componentes, representam a proporção da variância total explicada pelo respectivo autovetor e cada carga fatorial é proporcional à raiz quadrada do valor de variância atribuída pela respectiva variável ao fator.

A primeira PC teve da variável contagem total sua principal carga (0,99) e, secundariamente, das variáveis tório e urânio, com valores muito próximos, 0,906 e 0,899, respectivamente, e também apresentou coeficiente de correlação linear de 0,99, para um nível de confiança de 95%, com a variável contagem total e conseguiu delimitar, da mesma forma que aquela variável, o contraste entre rochas de caráter mais ácido das de caráter mais básico, possibilitando a delineação dos ambientes geológicos com metabasaltos, frequentemente associados, neste caso, à ocorrência de formações ferríferas. Apresentou, portanto, uma resposta contrastante e fundamental para a distinção de locais com maiores possibilidades de ocorrência de formações ferríferas com as características das encontradas na área do estudo.

A segunda PC, tendo no canal do K o maior peso relativo e com carga negativa, apresentou comportamento inverso ao da primeira PC e, portanto, apresentando da mesma maneira o contraste entre rochas de caráter mais ácido das de caráter mais básico. Não houve contrastes significativos entre as outras litologias presentes na área de estudo, marcando somente, como na primeira PC, a área de ocorrência de metabasaltos, a encaixante imediata das formações ferríferas na região.

Figura 5 - Gráfico do *Scree plot* para as 4 PCs analisadas.

A terceira PC, que tem sua maior carga na variável urânio (-0,317) e secundariamente na variável tório (0,256), apresentou comportamento variado e sem significado geológico aparente por toda a área de estudo. Em termos visuais, a quarta PC marca na forma de altos o principal corpo de formações ferríferas. Entretanto, quando comparado com valores anômalos selecionados para toda a área de abrangência do sobrevoô aerogeofísico, esta PC, não reconhece anomalias nos canais do potássio, tório, urânio ou contagem total, sendo então considerada como composta apenas de ruídos oriundos do levantamento aerogeofísico (**Figuras 6 e 7**).

Portanto a primeira PC é a mais indicada para identificar os contrastes entre rochas ácidas e básicas, com alto grau de equivalência ao canal da contagem total. Outra variável que atuou subsidiando a identificação das formações ferríferas foi à topografia que, via de regra, na localidade é sustentada pela geologia das formações ferríferas.

Figura 6 - Mapas das quatro principais componentes analisadas com sobreposição das formações ferríferas identificadas no mapeamento geológico. Os gráficos indicam as cargas das componentes principais indicando qual das variáveis tem maior influência nos cálculos. As formações ferríferas são apresentadas em preto.

Legenda

Geologia

- DSC Depósito Elúvio Coluvionar
- Formação Ferrífera
- Formação Ferríferas do domínio dos Metabasaltos, Metapelitos e Chert.
- Quartzito Ferrífero
- Embasamento - Anfibolitos e restos de supracrustais não individualizados
- Bt- ortogneisses de composição granítica a tonalítica
- Rochas metabásicas

- Anomalia do Sinal Analítico (nT/m)
- Contagem Total (cps)
- PC 1 (Adm)
- PC 2 (Adm)
- PC 3 (Adm)
- PC 4 (Adm)

Figura 7 - Perfis dos canais de anomalia do sinal analítico, contagem total, das 4 PCs geradas a partir dos dados gamaespectrométricos.

CONCLUSÕES

A utilização da técnica das principais componentes em dados gamespectrométricos mostrou-se efetiva na redução de dimensionalidade, fato comprovado a partir da correlação entre dados de contagem total e da primeira principal componente cujo coeficiente de correlação linear foi de 0,99, indicando uma correlação muito forte, quase perfeita.

Apenas a primeira PC foi selecionada com base no teste de *Scree*, portanto existe a possibilidade de que dimensões subjacentes em relação ao conjunto dos dados analisados podem não ter sido reveladas.

A primeira PC, por sua similaridade aos dados de contagem total, possibilita a inferência de ocorrência de ambientes geológicos associados com rochas metabásicas, apresentando significativo contraste com granitóides da região. Este contraste é importante, pois permite separar rochas encaixantes, em geral granitóides, das rochas metabásicas, principal ambiente geológico de ocorrência de formações ferríferas naqueles depósitos.

Zonas de baixo na primeira principal componente equivalem a zonas de baixo no canal da contagem total e quando sobrepostas a zonas com valores altos da anomalia do sinal analítico definem a provável ocorrência de formações ferríferas encaixadas em rochas metabásicas na área investigada.

Portanto, a aplicação da técnica de análise das principais componentes sobre os dados da geofísica nas mineralizações no Distrito Ferrífero de Curral Novo do Piauí, reforçam a tese que anomalias negativas no canal da contagem total combinadas com anomalias positivas do sinal analítico representam um quadro favorável para ocorrências de mineralizações ferríferas.

4.0 ÍNDICE E CARTAS DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIAS DE DEPÓSITOS DE MINÉRIO DE FERRO: PROPOSTA DE ABORDAGEM GEOFÍSICA DESENVOLVIDA NA REGIÃO DE CURRAIS NOVOS DO PIAUÍ (PI).

RESUMO

Jazidas de ferro são notáveis anomalias na crosta terrestre e o conhecimento precoce das probabilidades de acerto é um dado de extremo interesse para empresas de exploração mineral, auxiliando na análise de prioridades de investimentos nos trabalhos de prospecção. Estas probabilidades podem ser determinadas a partir de características geológicas particulares das formações ferríferas, nem sempre de obtenção rápida e a baixos custos. O objetivo deste trabalho é propor um método com análise conjunta de duas variáveis geofísicas (sinal analítico e a contagem total). A chave para a interpretação deste conjunto de dados, em termos de probabilidade de ocorrência de minério de ferro, é a sua transformação em valores positivos com valor de mínimo obrigatoriamente zero. Na determinação da variável Z, probabilística, e em sua interpretação, foram utilizados conceitos estatísticos presentes na literatura. Os resultados, comparados com dados reais, demonstram a aplicabilidade do método proposto para adotar rapidamente decisões de investimentos em projetos de exploração mineral, minimizando o grau de risco associado à pesquisa de ferro a partir da geração de mapas de probabilidade de ocorrência.

Palavras-chave: prospecção de minério de ferro, mapas de probabilidade de ocorrência, gamaespectrometria, magnetometria.

ABSTRACT

Iron deposits are notable anomalies in the crust and early knowledge of probability of success is a fact of extreme interest to exploration companies, assisting in analysis of their priorities for investment. These probabilities can be determined from particular geological characteristics of the iron formations, not always completed quickly and cheaply. The aim of this paper is to propose a method for joint analysis of two geophysical variables (analytical signal and total count). The key to interpreting this data set in terms of probabilities is the transformation into positive values with minimum equal zero. For determination of Z variable, probabilistic, and its interpretation, statistical concepts from literature were used. The results compared with geological data demonstrates the applicability of the proposed method to quickly adopt decisions in exploration projects, minimizing the degree of risk associated with study of iron formations beginning from generation of probability of occurrence maps.

Keywords: iron ore exploration, maps of probability, gamma spectrometry, magnetometry.

INTRODUÇÃO

Num cenário onde são desconhecidas as probabilidades de sucesso ou fracasso de um importante investimento a equipe técnica de uma empresa de exploração mineral fica em relativo desamparo. As ocorrências minerais serão evidências de depósitos economicamente viáveis. Será válido o investimento na implantação de infraestrutura necessária? De outra maneira em um cenário onde há uma efetiva melhora nas probabilidades de sucesso proporciona a equipe de exploração mais elementos para definição de prioridades e estratégias. Esta é em grande parte, a função dos métodos indiretos utilizados em prospecção mineral, os quais vêm sendo constantemente utilizados em associados em ambientes de sistemas de informação geográfica (SIG). Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um método realizado paralelamente a um programa de exploração mineral, em tempo real, o que possibilitou aperfeiçoar a idéia original a partir de testes imediatos. A partir dos resultados obtidos considerou-se possível o aperfeiçoamento das estratégias de exploração mineral no tangente às decisões de investimentos em projetos e o grau de risco associado à pesquisa de ferro a partir da geração de mapas de probabilidade de ocorrência, elaborados a partir de duas variáveis geofísicas: o sinal analítico e a contagem total.

Uma ampla gama de publicações versa sobre análises qualitativas e modelagens a partir de metodologias de processamento de dados geológicos vêm sendo testadas. Usualmente são pouco efetivas na discriminação de probabilidades, com a qualificação numérica de alguns parâmetros, dificultam a reprodutibilidade dos processos envolvidos e consequentemente, dos resultados alcançados, pois terminam com uma nítida inferência humana na análise das variáveis.

Este trabalho propõe a construção de um índice quantitativo para a delineação de ambiências propícias a ocorrência de formações ferríferas à magnetita e passíveis de serem interpretados em termos de probabilidades, permitindo a posterior geração de mapas de probabilidade de ocorrências de ambiências geológicas favoráveis à ocorrência de mineralizações de formações ferríferas à magnetita e a verificação de valores de probabilidade de ocorrência para os quais forma mapeadas formações ferríferas permitem configurar os limiares de busca de alvos para a prospecção de formações ferríferas semelhantes às que ocorrem no Distrito Ferrífero de Curral Novo do Piauí, PI.

Para a obtenção precisa da delimitação das ambiências geológicas favoráveis foi criado um índice a partir da subtração do sinal analítico da contagem total. Este índice, transformado em termos de probabilidade, tem em seus percentis a possibilidade de interpretação dos dados em termos de probabilidade de ocorrência.

A área de estudo está localizada no sudeste do Estado do Piauí, e faz fronteira com o estado de Pernambuco à aproximadamente 200 km da cidade de Petrolina, tem suas principais ocorrências de minério de ferro nos municípios de Curral Novo do Piauí, Simões e Betânia do Piauí (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo

Geologia Regional e as formações ferríferas

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Zona Transversal da Província Borborema, que equivale à Região de Dobramentos Nordeste de Brito Neves (1975). Constitui um domínio de intensa complexidade litoestrutural e de longa história crustal, onde são bastante evidentes os efeitos dos eventos tectônicos, termais e magmáticos do Cido Brasileiro, ressaltando a sua evolução policíclica (Santos & Brito Neves, 1984). Alcançam maiores expressões na Província os terrenos pré-cambrianos, em especial: o embasamento retrabalhado nos eventos Transamazônico e Brasileiro; as supracrustais do Proterozóico; e expressiva ocorrência de suítes graníticas Neoproterozóicas além das Coberturas Sedimentares do Fanerozóico (Ribeiro & Vasconcelos, 1991).

O domínio mais antigo, de idade arqueana, é formado por rochas do Complexo Gnaíssico-Migmatítico com rochas plutônicas associadas, articulado com associações tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG) e supracrustais metavulcanossedimentares denominado o Complexo Granjeiro por [Bizzi *et al.* \(2001\)](#), sendo, portanto, substrato das sequências supracrustais. Engloba grande variedade de litotipos, predominando rochas gnáissicas, tanto de caráter orto, como paraderivado. No que diz respeito à geocronologia, os dados disponíveis permitem o seu enquadramento no Neoarqueano a Paleoproterozóico ([Cordani & Brito Neves 1982](#)).

As supracrustais compreendem os metapelitos e metapsamitos, com considerável contribuição vulcânica, do Grupo Cachoeirinha. Os litotipos mais característicos são os cloritaxistos, sericita-cloritaxistos e albita-cloritaxistos. Esta unidade é considerada de idade mesoproterozóica por correlação com outras supracrustais da região. Um expressivo conjunto de granitóides Neoproterozóicos de composição variável entre granodioritos, monzonitos, quartzó-sieno granitos e álcali-sieno granitos completam o arcabouço pré-cambriano da região. As coberturas sedimentares fanerozóicas são representadas por sedimentos cretácicos da Bacia do Araripe, constituindo a Formações Santana, caracterizada pela associação de fácies siliciclásticas, evaporíticas e carbonáticas; e pela Formação Exu formada essencialmente por arenitos.

As formações ferríferas da localidade denominada Massapê-Manga Velha e demais ocorrências de ferro cadastradas nos arredores deste alvo mostram, como traço comum, a sua associação com componentes líticos do Complexo Granjeiro. De acordo com [Santos \(1996\)](#), o Complexo Granjeiro encerra duas associações litoestratigráficas diacrônicas, com o seguinte arranjo e particularidades: um conjunto mais antigo de rochas supracrustais, composto por metamáficas anfibolitizadas, tufos máficos e félsicos xistificados, *metacherts*, formações ferríferas, paragnaisses, calcissilicáticas, quartzitos e xistos paraderivados; presença de componentes vulcanossedimentares e indusão de horizontes químico-exalativos apontando para processos desenvolvidos em ambiente de crosta oceânica; uma unidade constituída por ortognaisses granodioríticos a tonalíticos com idade U-Pb SHRIMP 2,54 Ga ([Silva *et al.* 1997](#)) com evidências de intrusão e/ou assimilação das supracrustais em questão, atestando o caráter plutônico desses ortognaisses. Estas interpretações relacionadas às supracrustais e aos ortognaisses, combinadas com idades modelo TDM obtidas nestas rochas no intervalo 2,65-2,55Ga, sugerem que o Complexo Granjeiro representa um remanescente arqueano de um sistema do tipo bacia oceânica-arco magmático.

As formações ferríferas pré-cambrianas, conhecidas genericamente como formações ferríferas bandadas (*Banded Iron Formations* - BIFs), são únicas ao longo do registro sedimentar, face aos processos de formação (não atualísticos) e às potencialidades minerais. É de consenso geral que a maior concentração deste tipo de deposição situa-se entre unidades Arqueanas e Paleoproterozóicas, sem ocorrência após 1,8 G.a, com exceção dos depósitos do final do Neoproterozóico, geralmente associados às sucessões sedimentares com influência glacial. Baseando-se nas proposições de James (1954) e Trendall (1983), Klein (2005) define-se as formações ferríferas como sedimentos químicos finamente laminados, onde a principal característica composicional é o alto conteúdo de ferro geralmente intercalado, mas não obrigatoriamente, com níveis de *chert*. Na definição original de James (1954) o limite mínimo do conteúdo de Fe é estabelecido em $\geq 15\%$.

Os registros de formações ferríferas mais antigos conhecidos são os da região de Issua, oeste da Groenlândia, datados de 3,8 Ga e relacionados a núcleos cratônicos Arqueanos (Dymek & Klein, 1988; Klein, 2005). Outros exemplos Arqueanos ocorrem associados a sequências do tipo *greenstone belt*, com idades entre 3,5 a 2,5 Ga, nos quais se inserem as ocorrências do Grupo Nova Lima (Dorr II, 1969) e do Grupo Lavapés no *greenstone belt* de Piumhi (Fernandes et al. 2004) no Estado de Minas Gerais. Nesse mesmo contexto, com base nas idades admitidas para o Complexo Granjeiro, inserem-se as ocorrências do aqui estudadas. O registro das maiores ocorrências (em tamanho e volume de depósito) ocorre a aproximadamente 2,5 Ga, devido ao tamanho das bacias de Hamersley, na Austrália, situado entre 2,6 a 2,45 Ga (Trendall & Blockley, 1970), assim como de Transvaal, na África do Sul, de idade aproximada entre 2,5 a 2,3 Ga (Klein & Beukes, 1989). Associados a esse intervalo de tempo encontram-se também os depósitos brasileiros do Grupo Itabira, no Quadrilátero Ferrífero, e Grão Pará, na Serra dos Carajás.

Gross (1965) classificou as formações ferríferas em dois tipos: *Algoma-type* (tipo Algoma) e *Lake Superior-type* (tipo Lago Superior). As formações ferríferas do tipo Algoma estão predominantemente relacionadas ao período Arqueano, sendo os fácies carbonato, silicato e sulfeto os mais comuns e tem ocorrência associada a rochas vulcânicas máficas e félsicas e a sedimentos dásticos e vulcanodásticos de leques submarinos (Cannon et al, 1995), em ambiente tectônico que pode incluir arco de ilhas (Gross, 1983). Assim, por suas dimensões, associações litológicas, ambiente tectônico e idade pode-se supor que o depósito estudado classifica-se como do tipo Algoma, embora estudos complementares sejam necessários para tal afirmação.

Estudos mais recentes realizados na área do prospecto (Dias & Silva, 2009; Costa, 2010) trazem novos dados acerca da petrografia e geoquímica que de acordo com os autores indicam a presença dois tipos de formações ferríferas no mesmo jazimento sugerindo, portanto um modelo misto hipogênico-supergênico para a geração do minério de ferro do distrito de Curral Novo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O levantamento aerogeofísico foi realizado por uma aeronave Caravan *Aircraft*, com a instalação da instrumentação geofísica a cargo da Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica LTDA. O levantamento foi realizado a partir de sobrevôo com altura nominal de vôo de 100 m e velocidade média de 280 km/h com linhas espaçadas de 300 em 300 m e 3000 m entre as *tie lines*, com amostragens no magnetômetro a cada 0,1 s e nos canais radiométricos a cada segundo. Em termos de espaço o sobrevôo com essas características possibilitou leituras do magnetômetro a cada 8-10 m sobre as linhas sobrevoadas. No total foram levantados 4.291,55 km/lineares em direção Norte-Sul com as *tie lines* com direção leste-oeste.

O magnetômetro utilizado foi do tipo Geometrics G-822A, com sensibilidade de 0,003 nT, no intervalo de 20.000 a 100.000 nT, e ruído no sensor menor que 0,02 nT. Os dados coletados pelo magnetômetro tiveram a correção de *lag*, variação diurna e foram nivelados e micronivelados e posteriormente corrigidos pelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) a partir do modelo IGRF 2005 recalculado para a data do levantamento (Microsurvey, 2009). Já espectrômetro foi do tipo RSX 500, com captação dos sinais radiométricos em 1.024 canais. Nos dados radiométricos foram realizadas correções de *lag*, correção de tempo morto, processos de filtragem, remoção de vôo e *background* cósmico, remoção de *background* de radônio e estimativa do coeficiente *Skyshine*, remoção do efeito Compton, correção de altitude e posteriormente foram convertidos em concentração de radioelementos e micronivelados (Microsurvey, 2009). O sobrevôo foi entregue em projeção UTM local na zona 24 Sul, com *datum* SAD 69 e elipsoide de referência GRS 1967 e em função da resolução do levantamento a escala dos trabalhos é de 1:30.000.

A magnetometria é usualmente a primeira ferramenta utilizada na exploração mineral (Nabighian *et al*, 2005) associado a gamaespectrometria, são atualmente os método geofísicos

mais comuns na exploração mineral. A interpretação destes dados comumente é realizada de forma qualitativa e possibilitando o levantamento de alvos exploratórios apenas a partir das inferências de um interprete. O trabalho realizado desta forma é subjetivo e muitas vezes impossível de ser refeito com o mesmo grau de precisão.

Nabighian (1972, 1974) introduz o conceito de sinal analítico na interpretação magnética e mostra que sua amplitude é descrita por uma função em forma de sino sobre cada um dos cantos de um corpo bidimensional a partir de um perfil na seção onde se localiza o polígono. Ainda em relação ao sinal analítico diversos autores (Nabighian, 1972; 1974; Roest *et al*, 1992; Blum, 1999) ressaltam as vantagens da sua utilização destacando a independência do campo magnético total, direção de magnetização da fonte e o fato de não ter parâmetros dependentes da magnetização da fonte. Assim como a eficiência dos produtos gerados a partir do sinal analítico na determinação de parâmetros geológico-estruturais e geometria dos corpos.

Suas propriedades foram verificadas, para o caso de formações ferríferas a magnetitas na região de Curral Novo do Piauí e descritas em Sato *et al*, no prelo, confirmadas como geradoras de pontos de máximos sobre corpos de geometria tabular com grandes concentrações de materiais minerais ferromagnéticos na rocha.

Já a variável contagem total é uma variável dependente das concentrações dos elementos K, U e Th na fonte, do volume e eficiência do detector e do limiar de detecção do instrumento (IAEA, 2003) e corresponde a somatória de todos os pulsos radiométricos emitidos no intervalo de energia de 0,400 a 2,810 MeV.

Para a construção da variável índice foram realizadas as etapas descritas a seguir: Os valores da variável do sinal analítico, em nT/m, foram subtraídos dos valores da variável contagem total, em contagens por segundo. O conjunto de dados obtidos foi avaliado estatisticamente para obtenção dos parâmetros das estatísticas descritivas dos dados (*E.g.* Média, máximo, mínimo, desvio-padrão), a partir deste sumário, o valor de mínimo foi somado ao conjunto de dados obtidos a partir da subtração das variáveis do sinal analítico e contagem total dando origem a uma nova variável). Esta nova variável pode ser descrita como o resultado da operação de subtração dos dados, porém com a característica de possuir apenas valores positivos. Esta operação é fundamental para obtenção de valores em termos de probabilidade, pois, em se tratando de valores probabilísticos não pode haver variáveis negativas no conjunto dos dados (Leuangthong *et al*, 2008). Portanto a chave para

interpretação destes valores em termos de probabilidades é a transformação do conjunto de dados em valores positivos com valor de mínimo obrigatoriamente zero.

A transformação dos valores e a criação da variável Z, probabilística, para interpolação e interpretação dos dados em termos de probabilidade de ocorrência foi realizada a partir da normalização do conjunto de dados de forma que todo o conjunto dos dados tivessem média 0 e desvio-padrão 1. Para a criação da variável Z, probabilística, assumiu-se que os dados eram normalmente distribuídos, que a integral dos valores sob a curva normal padronizada é igual a 1 e que o conjunto dos dados da variável Z possui média zero e desvio padrão 1, de acordo com as premissas necessárias para a interpretação dos dados como distribuições normais descritas em [Leuangthong et al, 2008](#).

A fórmula utilizada para a transformação dos dados foi:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Onde Z é igual à diferença entre X (i.e. variável representante dos valores obtidos a partir do sinal analítico, somente com valores maiores que 0) e a média aritmética da população, μ , dos mesmos dados, divididos pelo desvio padrão, σ . A interpretação dos dados foi realizada a partir da função densidade de probabilidade normal padronizada.

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-1/2Z^2}$$

Esta função é a função densidade de probabilidade que apresenta os valores abaixo de sua curva representando áreas que integradas tem área igual a 1 e as propriedades descritas acima de média 0 e variância igual a 1 além de tornar possível a interpretação das áreas sob a curva em através da função densidade de probabilidade acumulada a ela associada e que pode ser representada pela integral:

$$f(Z_t) = \int_{-\infty}^{Z_t} f(z). dz = Prob\{Z \leq z1\}$$

Segundo [Luangthong et al, 2008](#), essas propriedades da função densidade de probabilidade acumulada e da função densidade de probabilidade são axiomáticas e permitem a interpretação de probabilidades em termos de proporções. Desta forma, o problema central proposto que é a determinação de incerteza em locais não amostrados pode ser solucionado através da criação da variável Z, como todos os valores presentes no conjunto de dados

representam uma área sob uma curva normal teórica e, portanto representa uma probabilidade de ocorrência de um evento determinado pela subtração das variáveis do sinal analítico da contagem total, evento neste caso que foi geologicamente interpretado como ambiente geológico favorável à ocorrência de formações ferríferas à magnetita (Sato *et al*, 2011, no prelo).

Os procedimentos para delimitação das anomalias para identificação dos ambientes com anomalias possíveis, anomalias prováveis, delineação do limiar e *background* foi realizado a partir de uma adaptação do método proposto por Hawkes & Webbs, 1962. De forma que o *background* definido como um intervalo e se caracteriza pelo limite superior das flutuações da variável analisada. E para este caso a variável denominada Índice TC-ASA normalizada foi definido a partir da média, portanto o *range* de composição do intervalo de *background* é do menor valor a média dos dados que é igual à zero, sendo esta a diferença da metodologia de Hawkes & Webbs, 1962.

Definido o *background* foi possível a delineação do limiar correspondente, neste caso a todos os valores maiores que zero até um zero mais um desvio-padrão. E consequentemente os intervalos de anomalias possíveis correspondentes aos valores no intervalo do limiar mais um desvio padrão e o intervalo de anomalias prováveis correspondentes ao intervalo do limiar mais um desvio padrão até o maior valor do conjunto de dados. Essa adaptação na proposta de Hawkes & Webbs, 1962 se fez necessária haja a vista que, na prática, a utilização dos procedimentos adotados neste trabalho se mostraram mais eficientes e condizentes com as áreas definidas como alvos exploratórios, apesar de ser menos conservadora que as propostas apresentadas nos trabalhos originais. Posteriormente foram definidos os intervalos de *background*, limiar e anomalias possíveis e prováveis, para a área de abrangência do sobrevoô aerogeofísico.

Na etapa seguinte foi à geração de mapas de probabilidades de ocorrência que foi realizada a partir da interpolação dos dados foi realizada a partir da utilização do método de mínima curvatura (Briggs, 1974) em função da agilidade e praticidade do método, em termos computacionais. A malha interpolada corresponde a uma malha idêntica a da realização dos dados e os pontos de amostragem correspondem aos pontos amostrados pelo gamaespectrômetro, os valores de magnetometria e consequentemente do sinal analítico foram reamostrados a partir dos valores amostrados pelo gamaespectrômetro visando à obtenção de um conjunto de dados com o mesmo número de informação para as variáveis

apresentadas. Todos os procedimentos realizados neste trabalho foram realizados com o *software* Oasis Montaj™ 7.0.1 e sua extensão Montaj™ *Geochemistry*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A criação do índice TC-ASA se dá de maneira direta a partir da subtração dos valores da contagem total (cps) dos valores do sinal analítico (nT/m) esta diferença apresenta de maneira direta ambiências geológicas propícias a ocorrência de formações ferríferas à magnetita (Sato *et al*, 2011 – no prelo).

O índice TC-ASA desenvolvido após a subtração da contagem total, em cps, pelo valor do sinal analítico em nT/m, apresentou valores negativos o que inviabiliza seu uso para construção de valores de classes a serem interpretados como probabilidades. Com o objetivo de contornar este problema o valor mínimo negativo de todo o conjunto de dados foi somado a todos os valores de forma que o menor valor presente no novo conjunto de dados é zero (Figura 2).

Figura 2 - Gráfico de análise do comportamento dos valores obtidos para a variável Z.

A geração de uma probabilidade de ocorrência associada a cada um dos pontos levantados pela aerogeofísica possibilita a indicação de uma probabilidade média de ocorrência para um polígono qualquer dentro da área do levantamento (*E.g.* Área de requerimento de pesquisa).

Esta variável probabilística interpretada à luz de uma adaptação metodologia proposta por Hawkes & Webb, 1962 para discriminação de anomalias geoquímicas possibilitou a discriminação de ambientes anômalos em termos de probabilidade de ocorrência de ambiências geológicas favoráveis a presença de formações ferríferas.

Definiu-se o *background*, como sendo um intervalo cujo limite superior das flutuações foi definido como o valor zero para o índice TC-ASA normalizado. Ambientes com valores do índice TC-ASA maiores ou iguais ao limiar mais um desvio padrão como ambientes possivelmente anômalos e ambientes maiores ou iguais ao limiar mais dois desvios padrão como provavelmente anômalos (Figura 3).

Figura 3 - Histograma da variável Z, probabilística, a partir da qual foram delineados os ambientes com anomalias possíveis e prováveis.

As estatísticas descritivas realizadas para os dados normalizados apresentam a análise sobre um conjunto total de 51.332 dados, com mínimo de -11,74 e máximo de 6,24 com média 0 e desvio-padrão 1, conforme os corolários para uma distribuição normal padronizada. A distribuição apresentou a média no percentil de 42,73, valores de anomalia provável, equivalentes a 1 desvio-padrão no percentil de 90,72 e valores de anomalias prováveis, 2 desvios-padrão a partir do percentil de 99,57. A partir da análise estatística dos dados foi possível a elaboração da classificação dos ambientes propícios à ocorrência de formações

ferríferas e sua comparação com mapeamentos geológicos regionais e de detalhe elaborados pela equipe técnica da BEMISA (**Tabela 1**).

Classe	Tipo	Area (Km ²)	Hectares (ha)	Área (%)
0	Valores abaixo do limiar	487.202	48.720.188	42.83
1	Limiar à 1 Desvio-Padrão	551.503	55.150.253	48.48
2	Anomalia Possível(Limiar + 1 Desvio-Padrão)	94.124	9.412.354	8.27
3	Anomalia Provável(Limiar + 2 Desvios-Padrão)	4.746	474.567	0.42
Somatórias		1.137.6	113.757.4	100.0

Tabela 1 - Classificação dos ambientes anômalos e suas respectivas áreas de abrangência dentro da área do levantamento aerogeofísico, para variável Z.

A cartografia de ambiências anômalas foi realizada com base na classificação definida e apresentada na **Tabela 1**, posteriormente foram realizados os cálculos de áreas referentes a cada uma das áreas classificadas o que possibilitou a avaliação da eficiência do método proposto em termos de diminuição de área a serem realizados trabalhos de exploração mineral, haja vista que as etapas de maiores gastos e consequentemente maiores riscos em projetos de exploração mineral estão associados às fases iniciais da exploração. Uma redução expressiva das áreas a serem pesquisadas em fases iniciais desoneram sensivelmente as somas a serem investidas em projetos de exploração mineral, proporcionando uma ágil seleção de alvos exploratórios para realização de trabalhos de detalhe e um investimento planejado a partir da priorização de alvos exploratórios com maiores probabilidades de ocorrência de ambiências anômalas com maior favorabilidade a ocorrência de formações ferríferas.

Os resultados obtidos foram interpretados com base nas áreas sob a curva normal, levando se em conta que cada um dos valores da variável Z representa uma área sob a curva normal e que pode ser interpretadas a partir da distribuição cumulativa dos valores da probabilidade da variável Z. A partir deste conceito foram gerados mapas de probabilidade de ocorrências de ambientes geológicos propícios à ocorrência de formações ferríferas que apresentam, em termos de probabilidades, as áreas mais e as menos suscetíveis a estas ocorrências (**Figuras 4 e 5**).

Figura 4 - Mapas da Contagem Total, em contagem por segundo (acima), e do Sinal Analítico, em nT/m, variáveis originais a partir das quais foi gerado o índice TC-ASA, com a subtração dos valores da Contagem Total dos valores do Sinal Analítico.

Figura 5 - Mapas do índice TC-ASA (acima) e mapa da variável Z, probalística obtida a partir da normalização do índice TC-ASA.

Observe-se que é necessário considerar, como parâmetro adicional, a questão da idade dos terrenos a serem prospectados, pois não apenas dados presentes na literatura indicam a maior abundância relativa de formações ferríferas no intervalo entre 2,8 e 2,2 Ga como rochas mais jovens podem fornecer respostas espúrias na aplicação do método proposto.

CONCLUSÕES

O método proposto permite o levantamento, de forma quantitativa, de alvos exploratórios, computacionalmente, a partir de dados oriundos de levantamentos aeroportados (magnetometria e gamaespectrometria).

A utilização da metodologia proposta permite a diminuição da área de pesquisa em estudos de *reconnaissance* proporcionando uma rápida seleção de alvos para mapeamento geológico, geoquímica e geofísica terrestre.

Para o caso da área de estudo houve uma imediata redução da área de pesquisa após a aplicação da metodologia em 42,83%. E a indicação de áreas com anomalias possíveis em apenas 8,27% da área de abrangência do sobrevoô aerogeofísico, com apenas 0,42% desta área como anomalias prováveis. Dentro das áreas de anomalias prováveis (limiar + 2 desvios-padrão), delineadas a partir do índice TC-ASA, estão presentes os corpos de maior expressão de formações ferríferas apesar de que ocorrências de formações ferríferas terem sido previamente identificadas a partir de mapeamento geológico de superfície.

Apesar da distribuição do ÍNDICE TC-ASA não obedecer a uma distribuição normal, graficamente é possível justificar o ajuste a uma distribuição normal para efeito de interpretação dos resultados e consequentemente a interpretação do ÍNDICE TC-ASA em termos de probabilidades servindo, portanto a processos de decisão para os quais valores monetários associados a probabilidades poderão indicar a priorização de alvos para a realização de trabalhos de exploração mineral. Jazimentos econômicos de formações ferríferas identificadas pela metodologia e a partir de mapeamento geológico de superfície tem seu mínimo em termos ambiente geológica com probabilidade de ocorrência de 57,81%. Ocorrências de formações ferríferas de menor expressão foram identificadas e confirmadas por mapeamento geológico de superfície em ambientes geológicos com probabilidade de ocorrência de 31,66%, em áreas com probabilidade de ocorrências menor que 31,66% não foram identificadas formações ferríferas.

Portanto a metodologia pode proporcionar uma expressiva redução de custos na fase de estudos de *reconnaissance*, minimizando riscos e proporcionando uma seleção direta de alvos prioritários para as fases de avaliação, cálculo de valores de alvos e sondagens exploratórias.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALEXANDROV, E.A. (1955) Contribution to the studies of origin of Precambrian banded iron ores. *Econ. Geol.*, 50: 453-455.
- [2] ALMEIDA, F.F.M. (1946) Origem dos minérios de Ferro e Manganês de Urucum. *Bol. da Divisão de Geologia e Mineralogia, DNPM*, 119: 1-58.
- [3] ANGELIM, L. A. de A. (1988) Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional – escala 1: 100.000 (Folha SC.24-V-A-III Santa Filomena) Estados de Pernambuco e Piauí. Brasília: DNPM/ CPRM. 146p. II. 2 mapas (*in bolso*).
- [4] BANERJI, A.K. (1977) On the Precambrian iron formations and the manganese ores of the Singhbhum Region, Eastern India. *Econ. Geol.*, 72: 90-98.
- [5] BEST, M.G. (2003) *Igneous and metamorphic petrology*, 2nd edition, Blackwell Publishing.
- [6] BEUKES, N.J. (1973) Precambrian iron formations of South Africa. *Econ. Geol.*, 68: 960-1004.
- [7] BEUKES, N.J. (1983) Paleoenvironmental setting of iron-formations in the depositional basin of Transvaal Supergroup, South Africa. *In: Trendall A.F., Morris F.C. (eds.) Iron formations facts and problems*. Elsevier, Amsterdam, pp.131-209.
- [8] BEUKES, N.J. & GUTZMER, J. (2004) Distribution, genesis and paleoecological significance of iron formation through time. *In: 1st Symposium on Neoproterozoic- Early Paleozoic events in SW - Gondwana, Extend Abstracts, IGCP-478, Second Meeting, Brazil*, p.6-7.
- [9] BEUKES, N.J. and KLEIN, C., (1990) Geochemistry and sedimentology of a facies transition – from microbanded to granular iron-formation-- in the early Proterozoic Transvaal Supergroup, South Africa. *Precam. Res.*, 47: 99-139.
- [10] BIZZI, L.A., SCHOBENHAUS, C. GONÇALVES, J.H., BAARS, F.J., DELGADO, I.de M., ABRAM, M. B., NETO, R. L., MATOS G. M. M., SANTOS, J. O.S. (2001) - Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas - SIG e Mapas na escala 1:2. 500.000 / Brasília: CPRM, 4 CD-ROM.
- [11] BLUM, M.L.B. (1999) Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Tese de doutorado- Universidade de Brasília, DF, 229p.
- [12] BLUM, M. de L. B., SILVA, A. M., JOST, H., MENESES, P. R., FUCK R.A., BROD, J. A., TEIXEIRA A.de A., SILVA, A. A. C., SPIGOLON, A. L. D., MAAS, M. V. R., SOUZA M. M., MACEDO JÚNIOR, P., LIMA, B. E. M. & CAMPOS, M. O. (2001) Aplicação de dados aerogeofísicos no mapeamento geológico do limite entre os terrenos arqueanos e proterozóicos da região de Crixás-Cedrolina, Goiás. *RBG 31 (3)*: 279-286 setembro de 2001.
- [13] BRIGGS, I. C. (1974) Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, Vol. 39, No. 1 (Feb. 1974), P. 39-48, 3 Figs., 3 Tables.

- [14] BRITO NEVES, B. B. (1975) Regionalização geotectônica do pré-cambriano nordestino. São Paulo, IGC-USP. Tese de Doutorado. 198p.
- [15] BRITO NEVES, B. B. (1982) The Pernambuco-Alagoas massif northeast Brazil. RBG, 12 (1-3): p. 240-250.
- [16] CANNON, S.H., POWERS, P.S., PIHL, R.A., ROGERS, W.P. (1995) preliminary evaluation of the fire-related debris flows on Storm King Mountain, Glenwood Springs, Colorado. U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 95-508, 38pp.
- [17] CLOUT J. M. F. (1973) Paleoeological significance of the banded iron formations. Econ. Geol. v.68 - pp.1135-1143.
- [18] CLOUT, J. M. F. & SIMONSON, B. M. (2005) Precambrian iron formations and iron formations-hosted iron ore deposits. Econ. Geol. 100th Anniversary Volume. P. 643-679.
- [19] CORDANI, U. G.; BRITO NEVES, B. B. (1982) The geologic evolution of South America during the Archean and early Proterozoic. Rer. Bras. de Geoc., v.12, n. 2, p.78-88, 1982.
- [20] COSTA, A.F. (2010, inédito) Caracterização petrográfica e litogeoquímica das rochas encaixantes e do minério de ferro da região de Curral Novo, Piauí. Monografia para bacharelado em geologia (TFG). Universidade Federal da Bahia. 110 p. Orientadores: Dra. Maria da Gloria Silva e Dr. José Haroldo da Silva Sá. Salvador, BA.
- [21] COX, K.J., BELL, J.D. & PANKHURST, R.J. (1979). The interpretation of igneous rocks. Allen & Unwin, London, 450 p.
- [22] DASGUPTA, H.C., SAMBASIVA Rao, V.V., KRISHNA, C. (1999) Chemical environments of deposition of ancient iron- and manganese-rich sediments and cherts. Sedimentary geology, v.125, issue 1-2, pp. 83-98.
- [23] DAVIS, J. C. (1986) Statistics and Data Analysis in Geology. John Winley & Sons.
- [24] DIAS, V.M.D. (2008) As formações Ferríferas do Alvo Manga – Velha – Massapê: Comunicação Técnica – Relatório Interno + Mapas.
- [25] DIAS, V.M. & SILVA, M.G. (2009) Mineralizações de ferro de Curral Novo, Estado do Piauí, e sulfetos associados: Prováveis depósitos do Tipo IOCG – II Simpósio Brasileiro de Metalogenia; Gramado, RS: Épocas metalogenéticas brasileiras; Cidos tectônicos e modelos metalogenéticos.
- [26] DORR II, J. Van N. (1945) Manganese and iron deposits of Morro do Urucum, Mato Grosso, Brazil. Bull.U.S. Geol. Surv., 946A, 47p.
- [27] DORR II, J. Van N. (1969) Physiographic, stratigrafic and structural development of Quadrilatero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S.Geol.Survey. Prof. Pap. 641-A, 109pp.
- [28] DYMEK, R.F. & KLEIN C. (1988) Chemistry, petrology and origin of iron -formations lithologies from 3800 Ma Isua supracrustal belt, West Greenland.

- [29] 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. *Rev. de Geol.*, Vol. 17, nº 1, 7-21.
- [30] FRENCH, B.M. (1973) Mineral assemblages in diagenetic low -grade metamorphic iron formations, *Econ. Geol.*, v. 68 - pp.1063-1074.
- [31] FRIPP, R.E.P. (1976) Stratabound gold deposits in Archean banded iron formation, Rhodesia. *Econ.Geol.* v.71 nº1, pp.58-75.
- [32] FRYER, B.J. (1983) Rare earth elements in iron-formation. *In*: A.F. Trendal & R.C. Morris (eds.), *Iron -formation: Facts and Problems*, Elsevier, Amsterdam, pp.345-358.
- [33] GARRELS, R.M., PERRY, E.A., & MACKENZIE, F.T. (1973) Genesis of Precambrian iron-formations and the development of atmospheric oxygen. *Econ. Geol.*, v. 68, pp. 1173-1179.
- [34] GEOSOFT (2008). Principal Component Analysis (PCA) and Factor Analysis in Oasis Montaj™ - Geosoft Technical Note. Technical note - Endereço eletrônico: <http://www.geosoft.com/resources/technotes>, 12 p.
- [35] GOMES, F. E. M. & VASCONCELOS, A. M.(1991) Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética - previewal - escala 1:100.000. Levantamento geológico sistemático da Folha Paulistana (SC.24-V-A-II) dos estados do PI e PE Brasília: DNPM/CPRM, 196p. Contém 2 cartas (*in bolso*).
- [36] GOODWIN, A.M. (1973) Archean Iron-Formations and Tectonic Basins of the Canadian Shield. *Econ. Geol.*, v. 68, pp.915-933.
- [37] GOVETT, G.J.S (1966) Origin of banded iron formations. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, v.77, pp.1191-1212.
- [38] GROSS, C.A. (1991) Geochemical data on iron formations. *In*: G.A Gross & J.A. Donaldson (eds.) *Iron formation and metalliferous sediments in central Canadá*. Geological Survey of Canada, p.57-59.
- [39] GROSS, C.A. (1965) *Geology of iron deposits in Canada. Vol.1 - General geology and evaluation of iron deposits*: *Geol. Surv.Can., Econ. Geol. Rept.*22, 181p.
- [40] GROSS, C.A. (1983) Tectonic systems and the deposition of iron formations. *Precam. Res.*, vol .20, pp.171-187.
- [41] GROVES, D.I. & PHILLIPS, G.N. (1987) The genesis and tectonic control on Archean gold deposits of the Western Australian Shield: A metamorphic-replacement model. *Ore Geol. Rev.* V.2 pp.287-332.
- [42] HAGEMANN, S.; DALSTRA, H.I; HODKIEWICZ, P., FLIS, M.; THORNE, W.; McCUIAIG, C. (1997) Recent advances in BIF-related iron ore models and exploration strategies. *In*: *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, p.811-821.

- [43] HAIR, J. F., TATHAM, R. L., ANDERSON, R. E., & BLACK, W. (2005). *Análise Multivariada de Dados*. Porto Alegre: Bookman.
- [44] HAWKES, H. E., & WEBBS, J. S. (1962). *Geochemistry in Mineral Exploration*. New York: Harper & Row.
- [45] HOFMANN, A., DIRKS, P.H.G.M., JELSMA, H.A. (2004) Shallowing- upward carbonate cycles in the Belingwe greenstone belt, Zimbabwe: A record of Archean sea-level oscillations. *Journal of Sedimentary Research*, v.74 (1), pp.64 -81.
- [46] HOUGH, J.L. (1958) *Geology of the Great Lakes*: Urbana, University of Illinois Press, 313p.
- [47] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA (2003) *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*, IAEA, July 2003, Viena- Austria, 173 p.
- [48] IRVINE T.N., BARAGAR, W.R.A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.* 8, 523-548.
- [49] JAMES, H.L. (1966) Chemistry of the iron-rich sedimentary rocks, chap, W. *In*: Fleischer, M., ed., *Data geochemistry*, 6th ed: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 440-W, 61p.
- [50] JAMES, H.L. (1954) Sedimentary facies of Iron Formation. *Econ.Geol.*49(3), pp.235-293.
- [51] KAUKIN, B.V. (1969) On the origin of ferruginous quartzites. In: *Problemy obrazovanya zelezistykh porod dokembriya (Problems of the formation of the formation of the Precambrian Iron formations)*: Kiev, Izd. Naukova Dumka, p.47-55(*in Russian*).
- [52] KIMBERLEY, M.M. (1978) Paleoenvironmental classification of iron formations. *Econ.Geol.* v.73, pp.215-229.
- [53] KIRSCHVINK, J.L. (1992) Late Proterozoic low-latitude glaciation: The Snowball Earth, In: Schopf, J.W. & Klein, C. (eds.), *The Proterozoic Biosphere: A multidisciplinary study*: Cambridge, Cambridge University Press, p.51-52.
- [54] KLEIN, C. (2005) Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin *American Mineralogist*, v. 90, pages 1473-1499.
- [55] KLEIN, C. & BEUKES, N.J. (1989) Geochemistry and sedimentology of a facies transition from microbanded to granular ironformation in the early Proterozoic Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 47 (1990) 99 - 139. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- [56] LE BAS, M.J., MAITRE, R.W., STRECKEISEN, A. (1996) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, v. 25:745-750.
- [57] LEUANGTHONG, OY; KHAN, K. D.; DEUTSCH, C. V. (2008) *Solved Problems in Geostatistics [Spiral-bound]*. John Wiley & Sons Inc. Publication; Amsterdam, 205 p.

- [58] MARTYNENKO, L.I. (1950) On the problem of formation of the high grade ores of Krivoy Rog. Uch.Zap.Chernovitsky. Univ.Ser. Geol. Geogr. (Sci. Mem. Chernovitsky Univ. Ser. Geol. Geogr. Geogr.), 2: 65-87(*in Russian*).
- [59] MEL'NIK, Y.P. (1982) Precambrian banded iron formations –Physicochemical conditions of formation. Kiev, U.S.S.R., Elsevier, 309 p.
- [60] MICROSURVEY (2009) Survey and logistics report on airborne magnetic gradiometry and gammaspectrometric geophysical survey on the Planalto Piauí Project for GME4 – Global Mine Exploration, 32p.
- [61] NABIGHIAN, M.N. (1972) The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37: 507-517.
- [62] NABIGHIAN, M.N. (1974) Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39: 85-92.
- [63] NABIGHIAN, M.N., GRAUNCH, V.J.S., HANSEN, R.O., LA FEHR, T.R.; LI, Y., PEIRCE, J.W., PHILLIPS, J.D. & RUDER, M.E. (2005) The historical development of magnetic method in exploration. 75th Anniversary. *Geophysics*, vol. 70, No.6 (November –December); p.33ND – 61ND, 6 Figs.
- [64] PARAK, T. (1975) Kiruna Iron Ores are not "Intrusive -Magmatic Ores of the Kiruna Type". *Econ.Geol.* v.70, pp.1242-1258.
- [65] PHILLIPS, G.N., GROVES, D.I., MARTYN, J.E. (1984) An epigenetic origin for Archean banded iron-formation-hosted gold deposits. *Econ. Geol.*, v.79, pp.162-171.
- [66] PIACENTINNI, T., BOGGIANI, P.C., YAMAMOTO, J.K., FREITAS, B.T., CAMPANHA, G.A.C. (2007) Formação ferrífera associada à sedimentação glaciogênica da Formação Puga (Marinoano) na Serra da Bodoquena, MS. *RBG* 37 (3): 530-541.
- [67] RAMPAZZO, G.J. (2007) Avaliação dos recursos minerais de ferro associados aos metadiamicritos da formação glacial Puga na região da Bodoquena - MS. Monografia de trabalho de formatura (TF-2007/17). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - SP; Orientador Jorge Kazuo Yamamoto. 50 p.+Anexos.
- [68] RIBEIRO, J.A, VASCONCELOS, A. M.(1991) Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional – escala 1: 100.000 (Folha SF.24-Y-C-VI Simões) Estados de Pernambuco e Piauí. Brasília: DNPM/ CPRM. 124p. Il. 2 mapas (*in bolso*).
- [69] ROEST, W. R., J. VERHOEF, & M. PILKINGTON, 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics*, 57, 116–125.
- [70] SAKAMOTO, T. (1950) The origin of the Pre-Cambrian Banded iron ores. *American Journal of Science*, v.248 (7), pp.449-474.

- [71] SAMPAIO, T. de Q.(1991) Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional – escala 1: 100.000 (Folha SC.24-V-A-V Afrânio) Estados de Pernambuco, Piauí e Bahia. Brasília: DNPM/ CPRM. 144p. Il. 2 mapas (*in bolso*)
- [72] SANTOS, E. J. & BRITO NEVES, B. B. (1984) Província Borborema *In*: Almeida F. F. M. & Hasuy Y. (Coord.). O pré-cambriano do Brasil. Edgard Blucher. P. 123-186.
- [73] SANTOS, E. J. (1996) Ensaio Preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 39, 1996, Salvador, Anais, 6:47-50.
- [74] SATO, E.N.; ALMEIDA, T.I.R.; DIAS, V.M.D.; YAMAMOTO, J.K. (2011) Identificação de assinaturas geofísicas dos ambientes de ocorrência de formações ferríferas a partir da utilização de estatísticas multivariadas. (Submetido à Rev. Bras.de Geofísica).
- [75] SCHEID, C; FERREIRA, C. A. (1991) Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética-previsional (folha SB.24-Z-D-I Patos). Escala 1:100.000, Estados de Pernambuco e Paraíba. Brasília, DNPM/CPRM.
- [76] SEMENENKO, N.P. BOYKO, V.L. BURGUNOV, I.N., LADIYEVA, V.D. and MAKUKHINA, A.A. (1967) Geology of sedimentary-vulcanogenic formations of the Ukrainian shield. Izd. Naukova Dumka, Kiev, 378 pp. (*in Russian*).
- [77] SHERVAIS, J.W. (1982) Ti- V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. Earth and Planetary Science Letters, v.59, pp.101-118.
- [78] SILVA, L. C.; McNAUGHTON N. J; VASCONCELOS A. M.; GOMES, J. R. C.; FLETCHER, I. R. (1997) U/Pb SHRIMP ages in Southern State of Ceará, Borborema Province, NE Brazil: Archean TTG Accretion and Proterozoic Crustal Reworking. *In*: CBPM, International Symposium on Granites and Associated Mineralizations – ISGAM, 2, Salvador, Extended Abstract and Program, 280–281.
- [79] SIMONSON, B.M. (1985) Sedimentological constraints on the origins of Precambrian iron-formations. GSA Bull. v.96 (2), pp.244-252.
- [80] TOUCHILIN, M.S. (1963) Origin of ferruginous quartzites. Gosgeolizdat, Moscow, 169 p. (*in Russian*).
- [81] TRENDALL, A.F. (1973) Precambrian iron formations of Australia. Econ.Geol., v.68: 1023-1034.
- [82] TRENDALL, A.F. (2002) The significance of iron formation in the Precambrian stratigraphic record. *In*: Precambrian Sedimentary Environments: A modern approach to ancient depositional systems. Special Publication nº33 of IAS (W. Altermann & P.L. Corcoran (eds.)), Blackwell Science, p.33-36.
- [83] TRENDALL, A.F. (1983) The Hamersley basin, *in* Trendall, A.F. and Morris, R.C. (eds.), Iron-formation: Facts and problems: Amsterdam, Elsevier, p.69-129.

[84] TRENDALL, A.F. & BLOCKLEY, J.G. (1970) The iron formations of the Precambrian Hamersley Group, Western Australia: Geol. Surv. of W. Aus. Bull. 119, 366p.

[85] TRENDALL, A.F. (1972) Revolution in earth history: J. Geol. Soc. of Aus., v.19, p.287-311.

[86] TRENDALL, A.F. & BLOCKLEY, J.G. (1970) The iron formations of the Precambrian Hamersley Group, Western Australia: Geol. Surv. W. Aus. Bull. 119, 366p.

[87] YOUNG, G.M. 1976. Iron formation and glaciogenic rocks of the Rapitan Group, Northwest Territories Canada. Precam. Res., v.3 - pp.137-158.