



Modelagem Prospectiva Mineral com Base em Lógica Fuzzy: Avaliação do Distrito Ferrífero de Quiterianópolis/CE

Mineral Prospective Modelling Based on Fuzzy Logic: Approach of Iron Ore District of Quiterianópolis/CE

Elenilton Bezerra Uchoa¹; Cynthia RomarizDuarte²;
ChristianoMagini² & Mateus de Paula Mirianda²

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia, Campus Sobral, Av. Dr. Guarani 317, Derby Clube, 62040-730, Sobral, CE, Brasil

²Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Campus do Pici, Bela Vista, 60440-554, Fortaleza, CE, Brasil

E-mails: elenilton.uchoa@ifce.edu.br; cynthia.duarte@ufc.br; magini2005@hotmail.com; mateuspmiranda@gmail.com

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_2_224_236; Recebido: 01/02/2020 Aceito: 15/05/2020

Resumo

Nos últimos anos, o estado do Ceará, participou do mercado internacional como produtor e exportador de minério de ferro, principalmente através de uma usina de beneficiamento da mina Bandarra localizada em Quiterianópolis/CE. Neste município são conhecidas cinco ocorrências de ferro: Calixto, Bandarra, São Francisco, Olho D'água e Pintada. A mina de ferro Bandarra produziu e exportou para China aproximadamente 1,2 milhões de toneladas de minério de ferro com teor de 60%. Esses depósitos de ferro estão contextualizados na Província Borborema Setentrional, Domínio Ceará Central, entre o Lineamento Transbrasiliano e a zona de cisalhamento Tauá, no Subdomínio Acaraú, onde predominam gnaisses do Complexo Canindé do Ceará, rochas metassedimentares do Grupo Novo Oriente, granitoides do Complexo Tamboril-Santa Quitéria e depósitos cenozoicos. A pesquisa propõe uma integração pelo método da Lógica Fuzzy (*knowledge-driven*), envolvendo dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) e de sensoriamento remoto com dados Landsat ETM+(Enhanced Thematic Mapper Plus), para elaboração de um modelo de prospectividade ferrífera para região de Quiterianópolis/CE. A Lógica Fuzzy consiste na simplificação de dados *raster* por meio da aplicação de funções de pertinência Fuzzy e posterior integração pelos operadores Fuzzy. O modelo prospectivo foi gerado através das imagens Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT), Amplitude do Sinal Analítico (ASA), %K, eTh, eU, Contagem Total (CT), PC1, PC3, PC5, PC6 e Razão ETM 3/1, 4/1 e 5/7. A imagem do mapa de prospectividade ferrífera apresentou três classes de prospectividade: baixa, média e alta prospectividade. As ocorrências de ferro localizam-se sobre áreas de alta prospectividade, servindo como referência para validação do modelo proposto. Através do modelo apresentado foi possível concluir que a técnica Fuzzy é uma ferramenta poderosa nas etapas iniciais de uma pesquisa mineral.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; Minério de ferro; Quiterianópolis

Abstract

Recently the state of Ceará, Brazil, has been an important iron ore producer and exporter, by Bandarra mine in Quiterianópolis city. In this city there are five known iron occurrences named Calixto, Bandarra, São Francisco, Olho D'água and Pintada. The Bandarra iron ore deposit produced and exported from Brazil to China about 1.2 million tonnes of iron ore with 60% content. These iron ore are located in Northern Borborema Province, Ceará Central Domain, between Transbrasilian belt and Taua Shear Zone, Acaraú Sudomain. There are predominantly gneisses of Canindé do Ceará Complex, metasedimentary rocks of the Novo Oriente Group, granitoids of Tamboril-Santa Quitéria Complex and cenozoic deposits. This research proposes the application of the Fuzzy Logic Method (*knowledge-driven*), involving airborne geophysics and remote sensing images from Landsat ETM+(Enhanced Thematic Mapper Plus), to make an iron prospectivity model of the Quiterianópolis region. The Fuzzy Logic is the simplification of raster data through application of fuzzy membership functions and integration by fuzzy operators. The iron prospectivity model was created with the Total Horizontal Gradient (THDR), Analytic Signal Amplitude (ASA), %K, eTh, eU, Total-Count Gamma Radiation, PC1, PC3, PC5, PC6 and ETM 3/1, 4/1 e 5/7 Ratios. The iron prospectivity image show three prospectivity classes: low, medium and high. The iron ore deposits are located on high prospectivity classes, serving as a reference for prospectivity model validation. We concluded that Fuzzy Logic technique is a powerful tool in the early stages of mineral exploration.

Keywords: Fuzzy Logic; Iron ore; Quiterianópolis

1 Introdução

Segundo o Sumário Mineral de 2015, do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), as reservas mundiais de minério de ferro são da ordem de 190 bilhões de toneladas, sendo as reservas lavráveis brasileiras, com teor médio de 49,0% de Fe perfazendo 11,9% das reservas mundiais. As principais reservas brasileiras concentram-se nos estados de Minas Gerais (72,5 %), Mato Grosso do Sul (13,1%) e Pará (10,7 %).

Entre 2011 e 2014, o estado do Ceará produziu e exportou para China cerca de 1,2 milhões de toneladas de minério de ferro processado com teor médio de 60,0% de Fe. A mina Bandarra, localizada em Quiterianópolis/CE, e administrada pela Globest Participações Ltda, foi a principal responsável por essas exportações que são realizadas através do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), a 50 km de Fortaleza/CE.

Depósitos de ferro geralmente produzem anomalias magnéticas elevadas, principalmente os depósitos magnetíticos. Os dados do levantamento aerogeofísico Projeto Novo Oriente da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) foram integrados com dados de sensoriamento remoto (Landsat 7/ ETM+), para prospecção de depósitos de ferro no SW do estado do Ceará.

Em geotecnologias destacam-se as técnicas de análise espacial para elaboração de modelos prospectivos, que incluem a Lógica Booleana clássica, Lógica *Fuzzy* e Lógica Dempster-Shafer (Bonham-Carter, 1994).

A integração de dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria), sensoriamento remoto e informações geológicas por meio da Lógica *Fuzzy* (*knowledge-driven*) permitem discriminar com muita eficácia, áreas mineralizadas e estéreis, possibilitando a seleção de áreas-alvo ricas em determinados minerais metálicos, tais como Fe, Cu, Ni e outros (Bonham-Carter, 1994; Zacchi *et al.*, 2010; Carrino *et al.*, 2011; Andrade *et al.*, 2014).

O modelo conceitual de depósito utilizado nesse trabalho foi o depósito de ferro da região de Quiterianópolis/CE, consistindo de itabiritos maciços hematíticos e/ou magnetíticos intercalados a rochas gnáissicas, cálcio-silicáticas e quartzíticas. A origem provável é vulcânica e/ou hidrotermal (?) e o controle da mineralização é o litológico ou estrutural (Ferreira,

2008; Araújo *et al.*, 2010; Pitombeira *et al.*, 2017).

Além da geologia clássica, é necessário a compreensão de novos métodos e técnicas de integração de dados que permitam discriminar áreas mineralizadas e estéreis (Salles, 2011). Localizada no extremo SW do estado do Ceará, a área de estudo engloba parte dos municípios de Quiterianópolis, Novo Oriente, Tauá, Independência e de dois municípios do estado do Piauí, Assunção do Piauí e São Miguel do Tapuio (Figura 1).

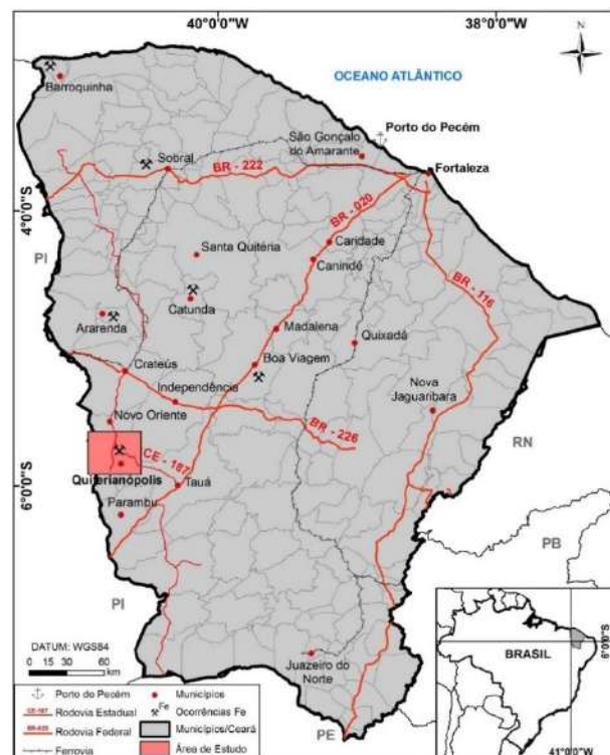


Figura 1 Localização da área de estudo com as rodovias federais e estaduais e os principais municípios do estado do Ceará. Fonte: base cartográfica (Araújo *et al.*, 2011).

2 Contexto Geológico

O Domínio Ceará Central (DCC) é a unidade geotectônica mais extensa da Sub Província Setentrional da Província Borborema, e encontra-se limitada a noroeste pela zona de cisalhamento Sobral-Pedro II (Lineamento Transbrasiliano) e a sudeste pela zona de cisalhamento Senador Pompeu (Almeida *et al.*, 1977; Arthaud *et al.*, 2008). Vale ressaltar que Arthaud (2007) define o limite sudeste do DCC pelas Zonas de Cisalhamento Orós e Aiuaba (Figura 2).

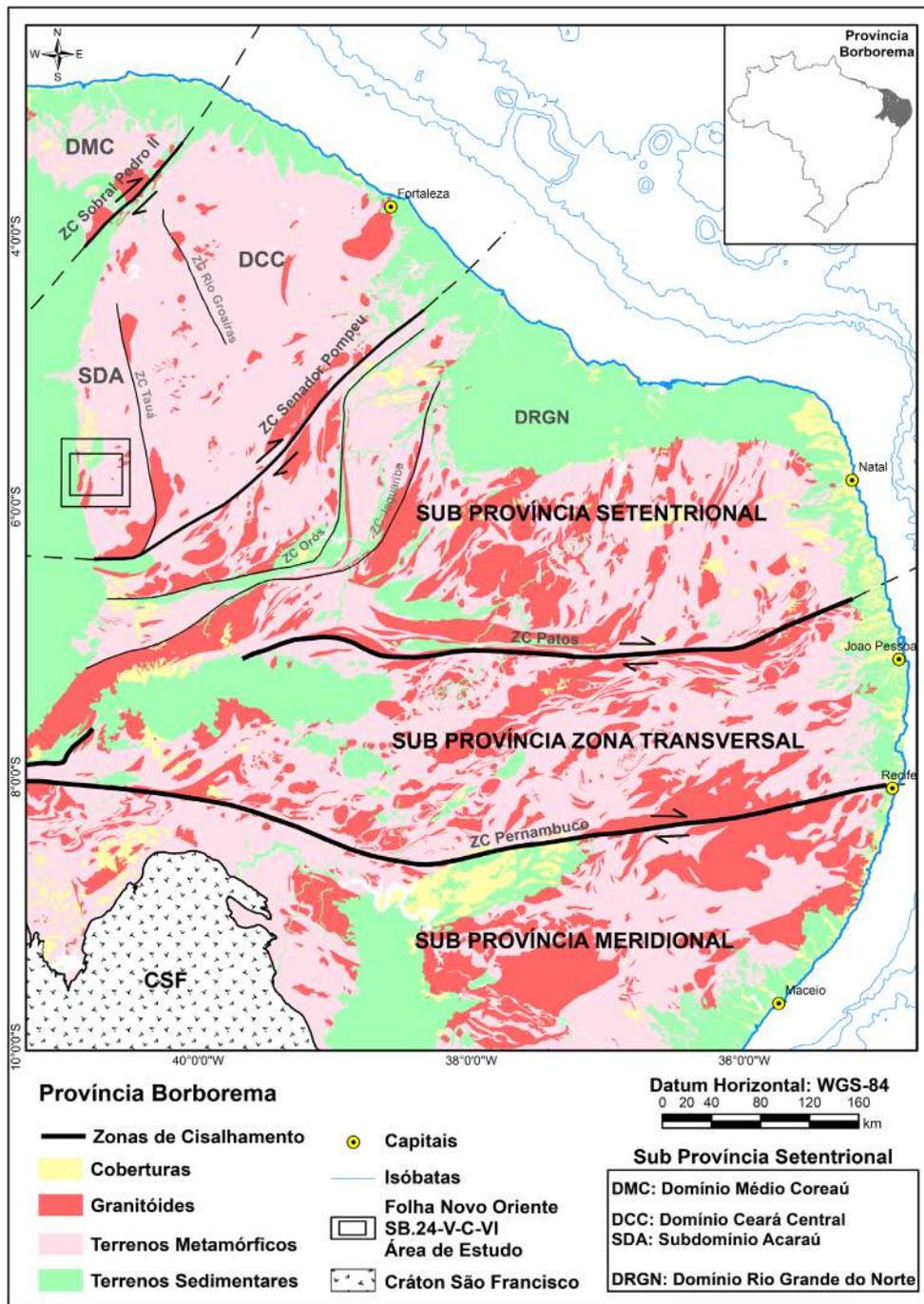


Figura 2 Mapa tectônico regional com as subdivisões da Província Borborema em: Sub Província Meridional, Sub Província Zona Transversal e Sub Província Setentrional, onde está localizada a área de estudo (Almeida *et al.*, 1977).

Os aspectos geológicos da área de estudo englobam rochas que seguem uma sequência cronoestratigráfica desde o Paleoproterozoico, através dos gnaisses do Complexo Canindé do Ceará, Mesoproterozoico, com as rochas metassedimentares do Grupo Novo Oriente (Formações Bonsucesso e Caraúbas), Complexo Tamboril Santa-Quitéria, e por fim, Diques Guaribas e Depósitos Superficiais

Recentes (Araújo *et al.*, 2011).

Das seis ocorrências de minério de ferro localizadas na Folha Novo Oriente (SB.24-V-C-VI), o presente trabalho abordará cinco, que estão localizadas no município de Quiterianópolis/CE e que são denominadas de: Calixto, Bandarra, São Francisco, Pintada e Olho D'Água (Figura 3).

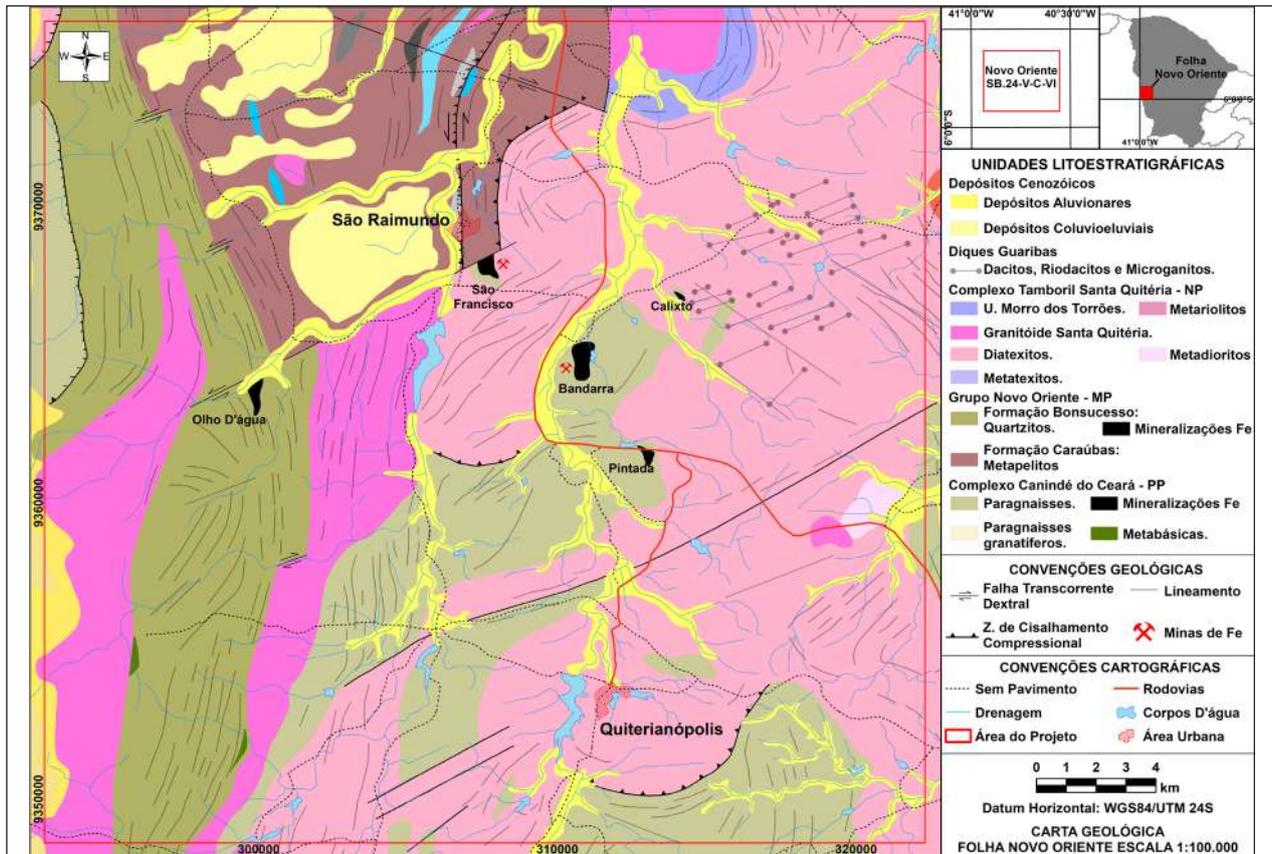


Figura 3 Mapa geológico da Folha Novo Oriente com destaque para as ocorrências de ferro e as unidades litoestratigráficas da área de estudo (Araújo *et al.*, 2011).

Quatro destas ocorrências possuem características localmente itabirítica e íntima associação com rochas cálcio-silicáticas. Estão hospedadas nas rochas do Complexo Canindé do Ceará e possuem o controle mineralógico litológico (Araújo *et al.*, 2010). Quanto aos aspectos mineralógicos observa-se níveis milimétricos a centimétricos de intercalações entre bandas de óxidos de ferro (hematita e/ou magnetita) e bandas quartzo-feldspáticas com finos níveis micáceos.

A ocorrência do Olho D'água, distintas das demais, possui característica maciça, mineralogia predominantemente hematítica e controle mineralógico estrutural, que se deu através de uma falha geológica sinistral localizada entre as ocorrências São Francisco e Olho D'água. Está encaixada nas rochas quartzíticas da Formação Bonsucesso (Grupo Novo Oriente). Esta ocorrência é resultado de remobilização do ferro hospedado das ocorrências anteriores e depositados em sítios deposicionais siliciclásticos de maior porosidade, atribuindo-lhe uma origem epigenética para esta ocorrência. O minério está encaixado nos quartzitos ou associado a zonas de falhas que possivelmente

agiram como conduto de soluções ricas em ferro (Ferreira, 2008; Araújo *et al.*, 2010).

3 Metodologia

3.1 Dados Aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos utilizados fazem parte do Projeto Novo Oriente (Código – 1074) que engloba a parte oeste do estado do Ceará e uma pequena porção no norte do estado do Piauí. A extensão dos perfis é de cerca de 52.973 km, cobrindo uma área de aproximadamente 24.708 km², com altura de voo de 100 m, velocidade de 270 km/h e intervalo entre medições geofísicas consecutivas (AM) 0,01s (magnetometria), decimadas para 0,1s e 1,0s (gamaespectrometria). As linhas de voo (N-S) possuem espaçamento de 0,5 km, enquanto que as linhas de controle (E-W) têm espaçamento de 10 km.

Para um melhor tratamento dos dados aerogeofísicos do Projeto Novo Oriente, foram seguidas diversas rotinas de pré-processamento com o objetivo de entender os principais algoritmos de micronivelamento, empregados para eliminar

tendências, e métodos de interpolação em malha de amostragem regular (Minty, 1991; Blum, 1999; Amaral, 2007).

Os dados aeromagnéticos foram reduzidos do International Geomagnetic Reference Field

(IGRF), que trata da contribuição geomagnética. Posteriormente, o campo magnético anômalo foi interpolado em malha regular (Blum, 1999). A Figura 4 mostra o resumo das etapas dos processamentos dos dados aeromagnéticos.

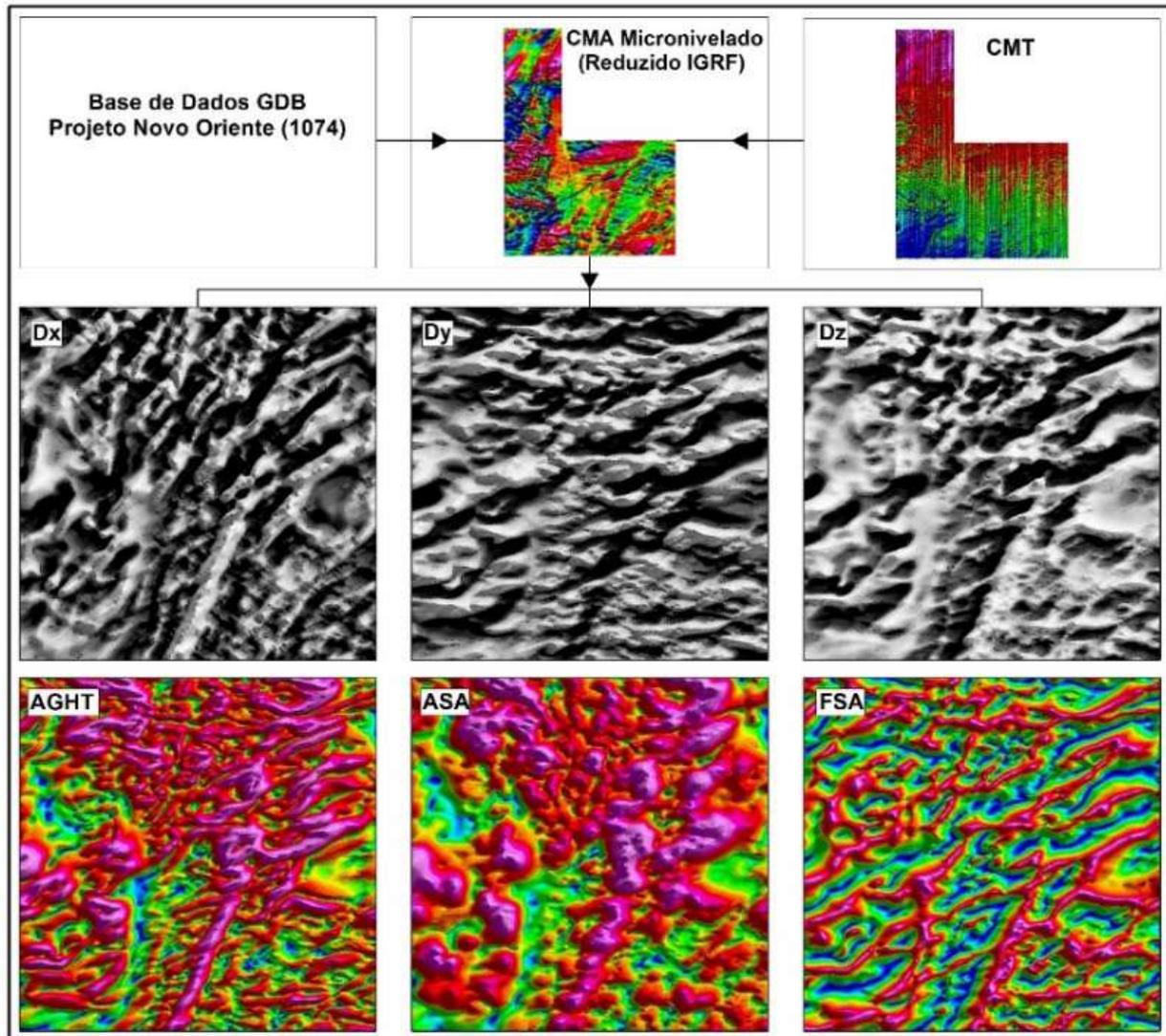


Figura 4 Etapas de processamento dos dados aeromagnéticos da área de estudo. Mapas do Campo Magnético Total (CMT), Campo Magnético Anômalo (CMA), Derivadas Horizontais (Dx e Dy) e Vertical (Dz), Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT), Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e a Fase do Sinal Analítico (FSA). Fonte: Dantas *et al.* (2006).

Os dados gamaespectrométricos são provenientes dos primeiros 30 cm da superfície da terra e são adquiridos através da radiação gama detectada da desintegração natural do potássio (^{40}K), tório (^{232}Th) e dos elementos da série do urânio (^{238}U), os quais estão presentes na composição da maioria das rochas (Cox *et al.*, 1979; Minty, 1988; Dickin, 1995; Faure, 1997). A Contagem Total (CT) pode ser adquirida por um aerogamaespectrômetro, através da medida de todos os raios gamas dentro da janela energética 0,41-2,81 MeV (Grasty *et al.*,

1985; Ribeiro *et al.*, 2014).

A partir dos dados obtidos, foram gerados os seguintes produtos : mapas radiométricos de concentrações de potássio (K em %), equivalente Tório (eTh em ppm), equivalente Urânio (eU em ppm) e Contagem Total (CT em $\mu\text{R/h}$), Razão entre os canais eTh/K, eU/K e eU/eTh. Por fim, foram elaboradas composições ternárias em falsa-cor RGB (Red Green & Blue) e CMY (Cyan Magenta & Yellow; Figura 5).

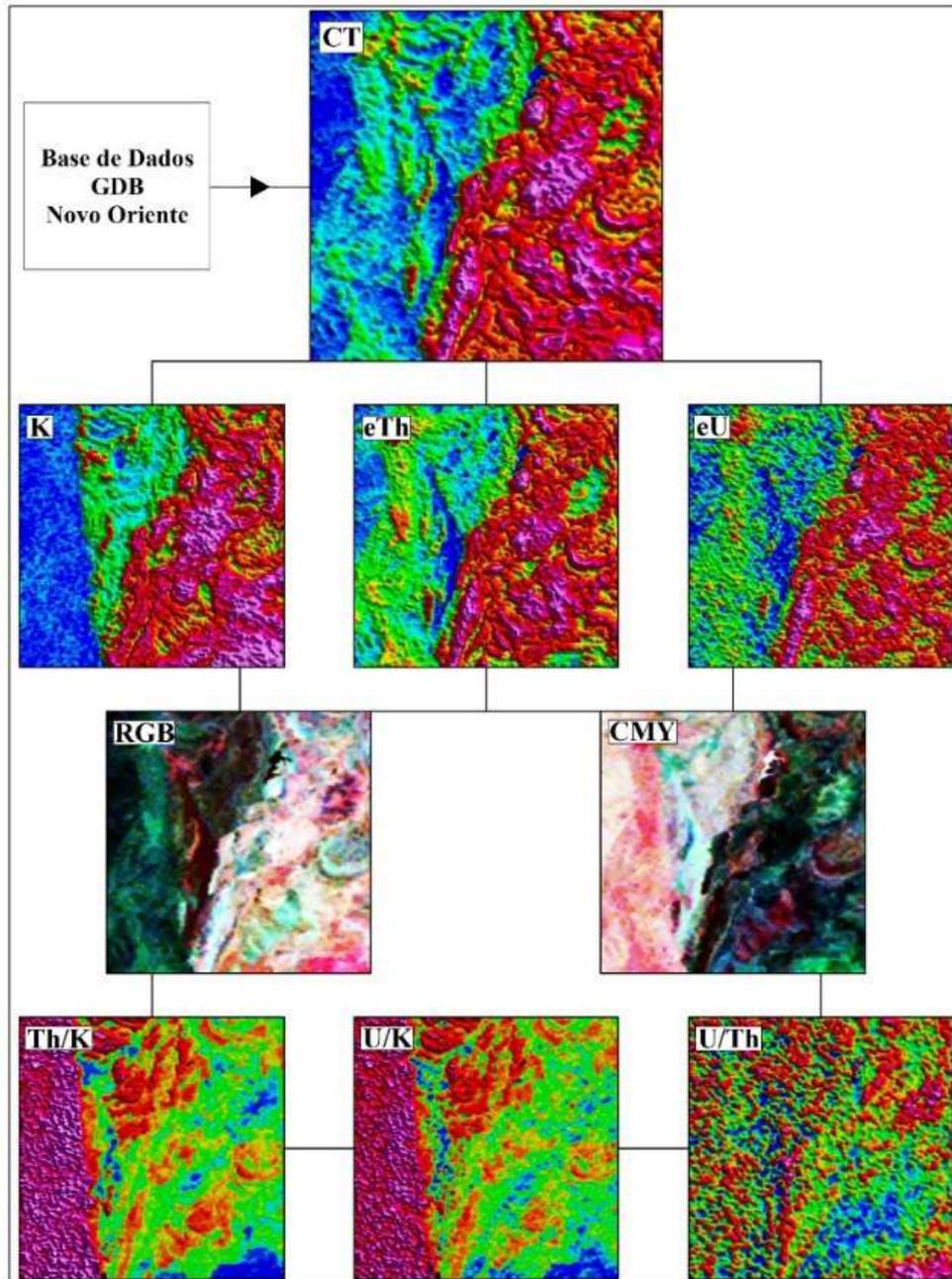


Figura 5. Etapas do processamento dos dados aerogamaespectrométricos da área de estudo. Mapas radiométricos de Contagem Total (CT), concentrações de radioelementos de Potássio (K), equivalente Tório (Th) e equivalente Urânio (eU), Composições ternárias falsa-cor RGB e CMY, e Razões Th/K, U/K e T/Th. Fonte: Dantas *et al.* (2006).

3.2 Dados de Sensoriamento Remoto

A base de dados de imagens do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) da série Landsat, foi adquirida através do banco de dados da *Global Land Cover Facility* (GLCF) que disponibiliza no seu *File Transfer Protocol* (FTP) pacotes de bandas multiespectrais em formatos TIFF/GeoTIFF através de sua Órbita/Ponto.

A cena ETM+ utilizada nesse trabalho foi selecionada após análise criteriosa de imagens em

três períodos diferentes do ano. Essa análise consistiu de avaliação quantitativa de vegetação e nuvens. A imagem com menor concentração de vegetação e nuvens, órbita/ponto 218_064, que contém a área de interesse, data de 31/07/2001.

Nas imagens ETM+ que contempla a área de estudo, foram utilizadas as técnicas de Análise por Principais Componentes (APC) e Razão de Bandas (Crósta, 1992).

Após realizada a APC analisou-se os dados estatísticos gerados (Tabela 1), de maneira a escolher

as PCs que trazem as informações mais relevantes para os materiais de interesse, através da análise

espectral dos mesmos. A Figura 6 mostra as imagens geradas pela APC.

	ETM 1	ETM 2	ETM 3	ETM 4	ETM 5	ETM 7
PC1	0,419648	0,432869	0,436713	0,302779	0,417874	0,423684
PC2	0,157832	-0,053911	0,113206	-0,924574	0,170326	0,274805
PC3	-0,530713	-0,408222	-0,137896	0,143144	0,598760	0,392020
PC4	0,661136	-0,266145	-0,654697	0,090208	0,235120	-0,004454
PC5	-0,144237	0,343135	-0,447346	0,020250	-0,446552	0,679350
PC6	0,243771	-0,674165	0,385621	0,156363	-0,427979	0,360219

Tabela 1 Principais Componentes e os fatores de peso de cada banda ETM+ (eigenvectors).

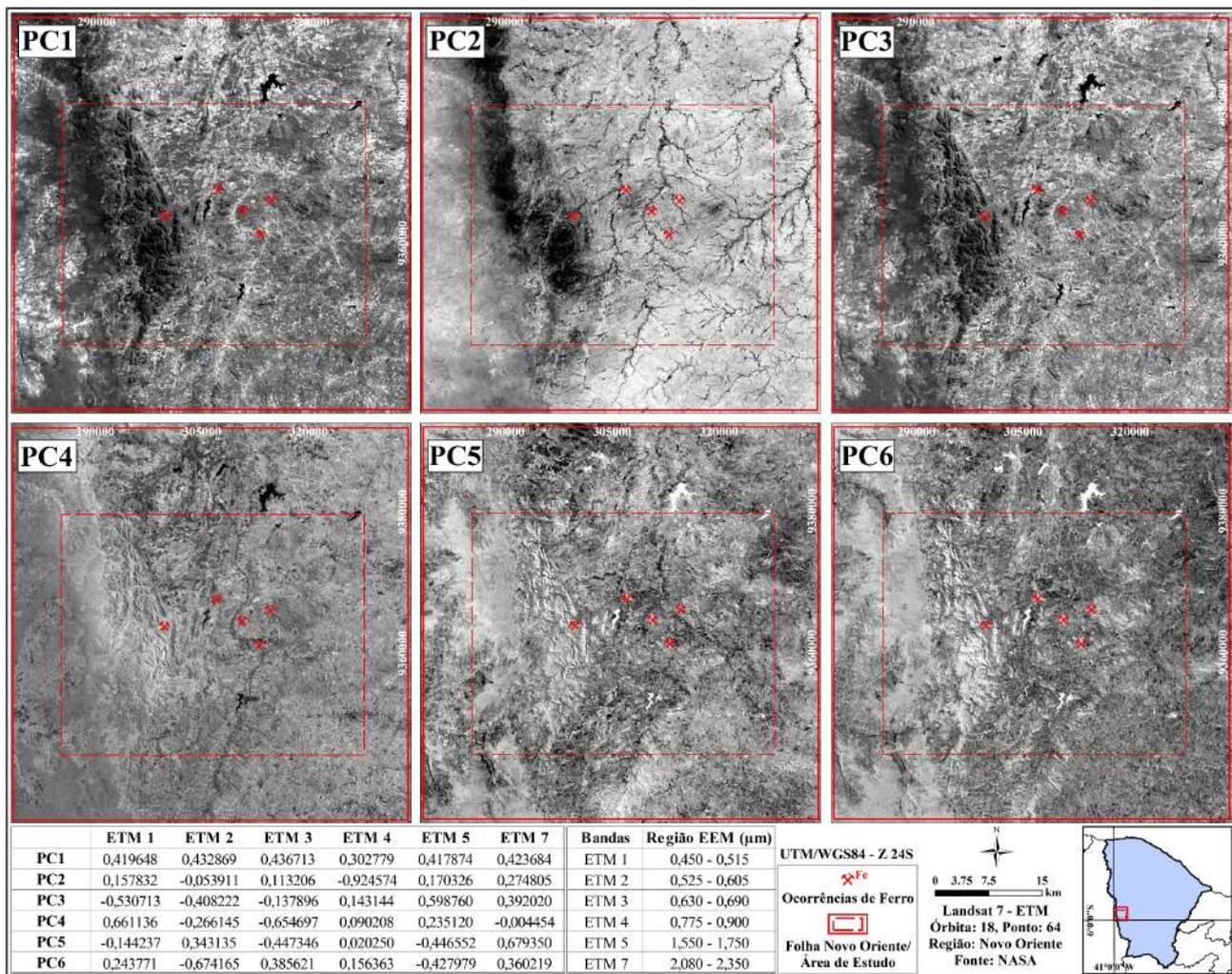


Figura 6 Imagens geradas da Análise por Principais Componentes (APC). De a) até f) mostra as PCs de 1 a 6.

Segundo Crósta (1992) a razão entre bandas multiespectrais é a operação mais comum em Processamento Digital de Imagens (PDI), sendo bastante utilizada para identificar concentrações minerais, uma vez que ao se selecionar bandas de forma a cobrir máximos (reflectância) e mínimos

(absorção), assim como mudanças na inclinação da curva espectral dos alvos, elas podem ser combinadas em pares de razões, realçando aspectos das assinaturas espectrais dos diferentes materiais.

Nas razões de bandas ETM3/ETM1 e ETM4/ETM1 os óxidos de ferro são apresentados em tons

escuras. Na razão ETM4/ETM1 a cobertura vegetal é bem marcada em tons claros.

4 Resultados e Discussões

4.1 Integração dos Dados e Modelagem Fuzzy

Foram aplicadas as pertinências *fuzzy* aos dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto, definidos pelas funções *Fuzzy Large* e *Small*. O critério empregado para a escolha da função

(*Large* ou *Small*) se deu através da análise dos produtos geofísicos e de sensoriamento remoto das ocorrências de ferro da área de estudo. A função *Large* foi aplicada nas imagens que apresentaram valores elevados próximo às ocorrências ferríferas. Enquanto que a função *Small* foi submetida às imagens que indicaram valores baixos de resposta para materiais ferríferos. As variáveis de *Spread* (f_1) e *Midpoint* (f_2) utilizadas são mostradas na Tabela 2.

ETM+ (Landsat)			AEROGEOFÍSICA (MAG/GAMA)		
Mapas Evidenciais	<i>Spread</i> (f_1)**	<i>Midpoint</i> (f_2)	Mapas Evidenciais	<i>Spread</i> (f_1)	<i>Midpoint</i> (f_2)
PC1	5	60*	AGHT	5	0,04 nT/m
PC3	5	80*	ASA	5	0,05 nT/m
PC5	5	220*	K	5	4,50%
PC6	5	230*	eTh	5	28,23 ppm
Razão ETM 3/1	5	51*	eU	5	3,29 ppm
Razão ETM 4/1	5	40*	CT	5	15 μ R/h
Razão ETM 5/7	5	127,5*			

Tabela 2 Parâmetros das Funções de pertinências utilizados nos dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto. *Valores em DN (*Digital Number*) – 0 a 255.

Salles (2011) ressalta que a seleção de valores de *Spread* e *Midpoint* apropriados é subjetiva, isto é, depende da escolha do usuário, através de análise criteriosa do intervalo de valores do conjunto de dados que serão “fuzzyficados”. Os valores de f_1 foram fixados em 5 que equivale ao valor de 0,5 numa função de pertinência, ou seja, os valores de f_2 (ponto de inflexão) são projetados no gráfico para uma pertinência de 0,5, segundo f_1 .

A escolha da função de pertinência (*Fuzzy Large* ou *Fuzzy Small*) para os dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto, foi realizada segundo controle criterioso das características geológicas dos depósitos ferríferos apresentados bem como suas respostas nos produtos gerados.

Para os dados aerogeofísicos, a alta suscetibilidade magnética apresentada pelos minerais magnetíticos e hematíticos das ocorrências de ferro, foi o fator preponderante na escolha da função de pertinência. Sendo assim, a função de pertinência *Fuzzy Large* foi aplicada aos dados aerogeofísicos de AGHT e ASA (magnetometria),

e K (%), eTh, eU e CT (gamaespectrometria), pois os maiores valores destes mapas estão sobre as áreas das ocorrências de ferro do mapa geológico.

A APC e razão de bandas são processamentos amplamente utilizados para realçar feições de alteração hidrotermal e/ou regiões ricas em ferro através da assinatura espectral dos alvos (Loughlin, 1991; Crósta, 1992; Bennett *et al.*, 1993; Ducart *et al.*, 2005; Uchoa & Castro, 2011). Portanto, a escolha das funções de pertinência para os produtos de sensoriamento remoto foi embasada conforme o comportamento espectral de minerais de Fe (magnetita e hematita), onde foi utilizado a função *Fuzzy Large* para os mapas de PC5, PC6 e Razão ETM 5/7, pois nesses produtos materiais ricos em Fe ficam realçados. Já a função de pertinência *Fuzzy Small* foi aplicada na PC1, PC3, Razão ETM 3/1 e Razão ETM4/1, uma vez que as mineralizações de ferro da área de estudo não são realçadas por esses produtos. As Figuras 7 e 8 apresentam os gráficos das funções de pertinência aplicadas aos dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto.

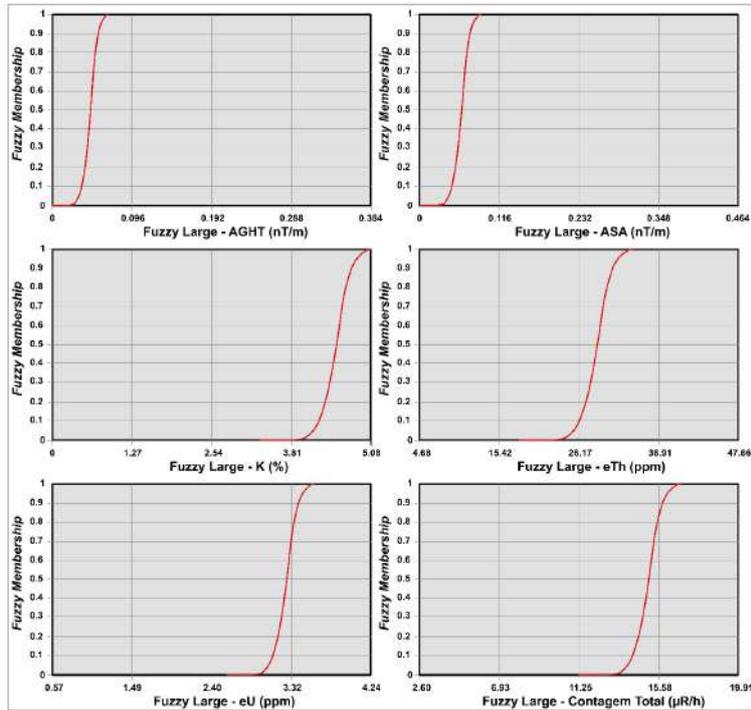


Figura 7 Fuzzyficação para o conjunto de dados aerogeofísicos. Funções *Fuzzy Large* e *Small* com diferentes valores de f_1 e f_2 . O eixo x representa os valores dos dados originais, eixo y com valores entre 0 e 1. Fonte: Tsoukalas & Uhrig (1997).

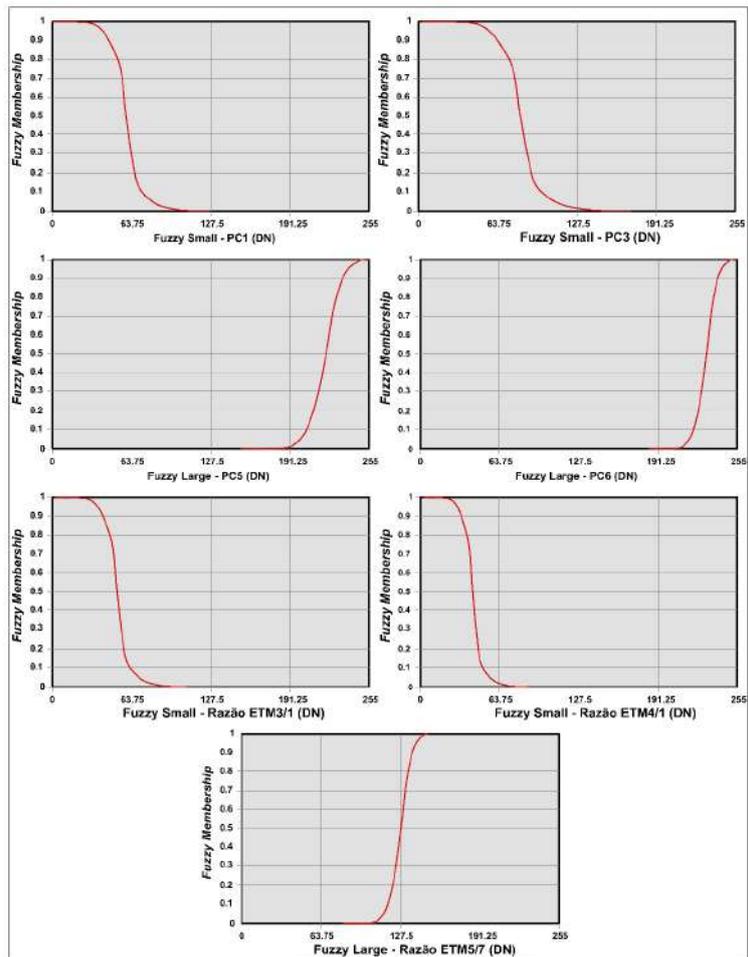


Figura 8 Fuzzyficação para o conjunto de dados de sensoriamento remoto. Funções *Fuzzy Large* e *Small* com diferentes valores de f_1 e f_2 . O eixo x representa os valores dos dados originais, eixo y com valores entre 0 e 1. Fonte: Tsoukalas & Uhrig (1997).

4.2 Operadores Fuzzy

Como estratégia para a integração dos dados e elaboração do modelo de prospectividade

ferrífera, aplicou-se os operadores *fuzzy* aos mapas evidenciais (*fuzzy membership*). A Figura 9, mostra de forma esquemática as etapas de processamentos utilizadas.

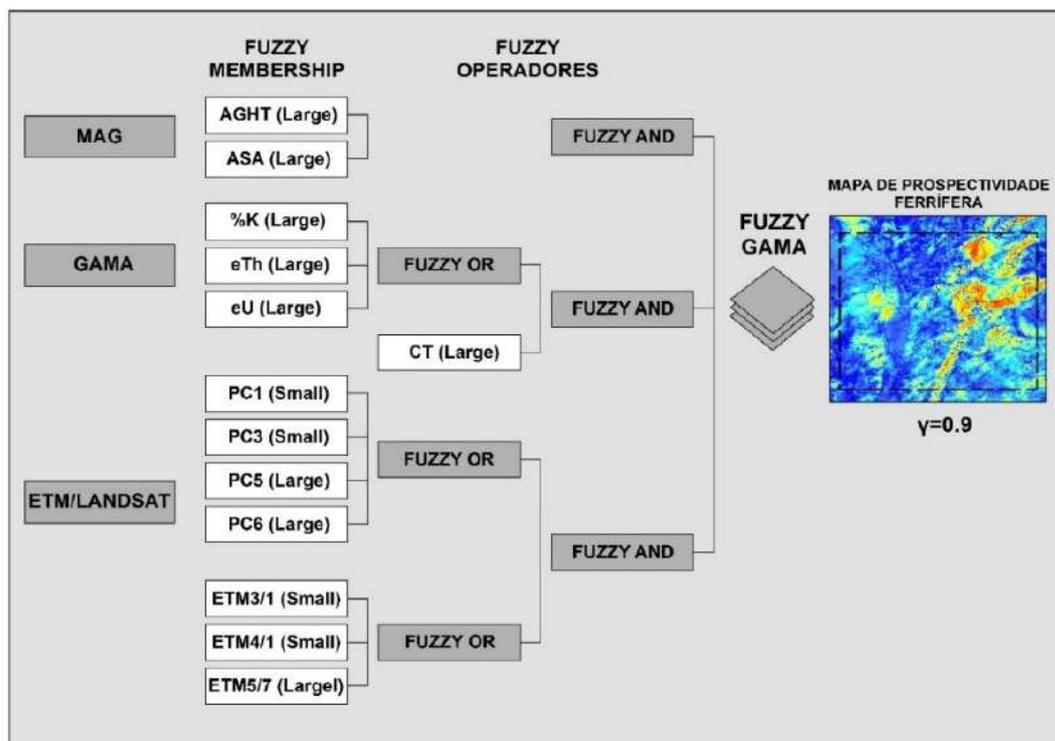


Figura 9 Fluxograma esquemático para integração dos dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto na Lógica *fuzzy*.

Na lógica *fuzzy*, a ideia de integração entre mais de um tipo de dado é extremamente utilizada em diversas áreas, sendo útil para elaboração de modelos bem refinados, capazes de dar um direcionamento para a tomada de decisões. No caso da pesquisa mineral, possibilita a seleção de áreas-alvo para realização de cartografia geológica e prospecção mineral.

Os operadores *fuzzy* utilizados para realizar a integração dos dados foram: *Fuzzy OR*; *Fuzzy AND*; e *Fuzzy GAMA*, sendo que este último, com valor de 0.9 para .

4.3 Mapa de Prospectividade Ferrífera

O mapa de prospectividade ferrífera da área de estudo foi resultante da integração dos dados através do operador *Fuzzy GAMA*. A escolha do parâmetro encontra-se entre os valores utilizados por diversos autores (Zacchi *et al.*, 2010; Carrino *et al.*, 2011).

Os intervalos de pertinência *fuzzy* variaram entre 0 e 0.99, e foram divididos em três classes de prospectividade ferrífera: Baixa (0 a 0.33),

Média (0.33 a 0.66) e Alta (0.66 a 0.99). Na Figura 9 pode-se observar que mais de 90% da área está classificada como Baixa a Média prospectividade ferrífera, corroborando a qualidade do modelo, que tem como objetivo a seleção de áreas específicas com potenciais para Fe.

A validação da modelagem espacial pela Lógica *Fuzzy* pode ser atestada através das ocorrências de ferro já cartografadas e conhecidas, onde quatro das cinco ocorrências estão situadas em áreas com alta prospectividade ferrífera, à exceção da ocorrência de Olho D'água, que é caracterizada como um depósito epigenético, resultado de remobilização de Fe de rochas originais possivelmente através da percolação de fluidos hidrotermais através de zonas de falha (Araújo *et al.*, 2011).

Através da localização das principais ocorrências de ferro da área de estudo observou-se que os materiais ricos em ferro possuem uma pertinência *Fuzzy* entre 0.66 e 0.74, indicando alta prospectividade. Em áreas situadas entre 0.66 e 0.74 foi detectada a ocorrência de materiais ricos em ferro como: formações ferríferas, metacherts ferríferos e

rochas calcissilicáticas ricas em magnetita (Araújo *et al.*, 2010).

Em função da ocorrência de ferro do Olho D'água, áreas classificadas como de média prospectividade não devem ser descartadas, uma vez que podem apresentar materiais de interesse para a pesquisa de ferro, sobretudo, em regiões de zona de falha geológica.

A região NE da área de estudo revelou-se uma área muito promissora no modelo proposto,

pois possui uma alta prospectividade ferrífera em grande parte de sua abrangência, com destaque para as ocorrências de ferro na porção Centro-NE.

Os resultados obtidos através do processamento dos dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto e o modelo gerado evidenciaram ainda duas áreas com alta pertinência *Fuzzy* (>0.74), localizadas a NNE e a ENE, respectivamente, no entanto, são áreas que ainda carecem de registro de campo para validação dos dados (Figura 10).

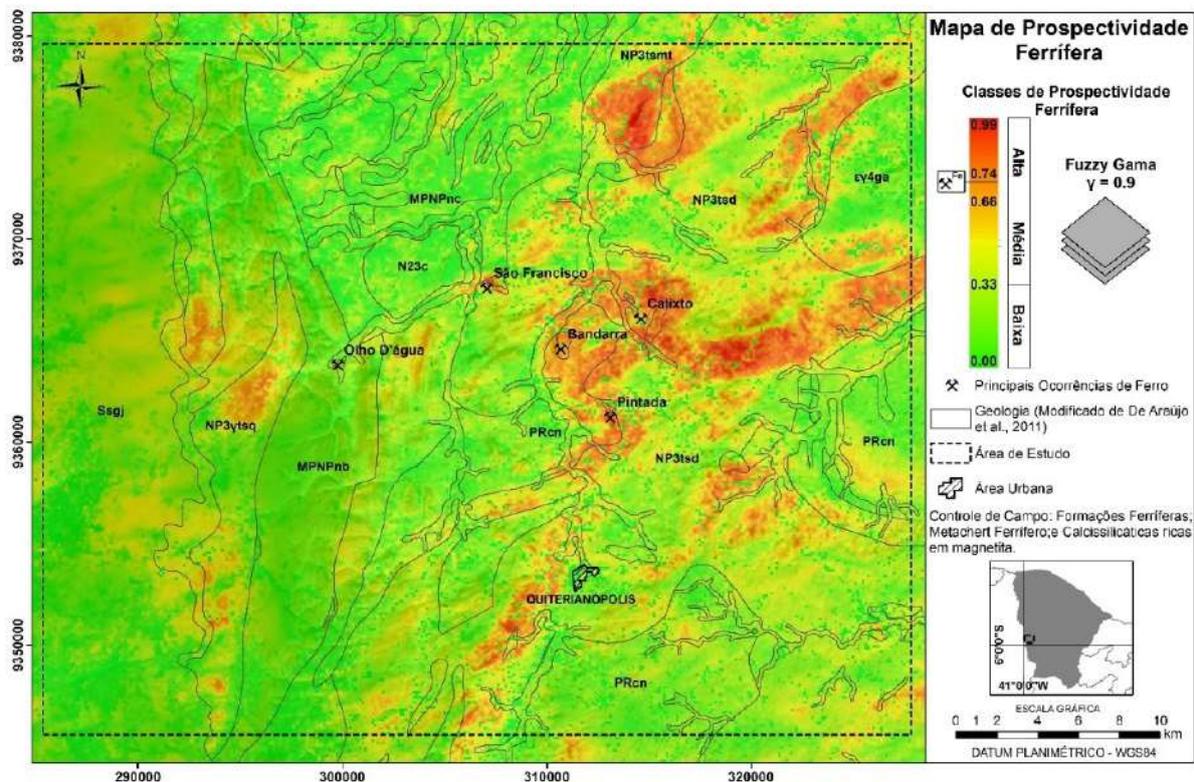


Figura 10 Áreas de prospectividade ferrífera a partir da integração de dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto. Valor de gama: 0.9.

5 Conclusões

A modelagem espacial pelo método da *Lógica Fuzzy* aplicada na integração de dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) e de sensoriamento remoto (ETM+/Landsat) revelou-se um método muito importante para as etapas de prospecção mineral, uma vez que foi capaz de evidenciar áreas específicas, potencialmente ricas em ferro.

O modelo de prospectividade ferrífera aqui proposto, elaborado através dos operadores *Fuzzy*, possui três classes de prospectividade, Baixa, Média e Alta. Mais de 90 % da área está classificada como Baixa e Média. As ocorrências de ferro do Calixto, Bandarra, São Francisco e Pintada, estão localizados

em áreas de Alta prospectividade ferrífera, com pertinência *Fuzzy* entre 0.66 e 0.74, corroborando assim para a validação do modelo apresentado.

Pelo modelo prospectivo apresentado é possível concluir que o método da *Lógica Fuzzy* é uma ferramenta poderosa durante as etapas iniciais de uma pesquisa mineral, sobretudo a ferrífera, pois possibilitou a seleção de áreas em três níveis específicos.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de estudos, à empresa GLOBEST PARTICIPAÇÕES LTDA pelo apoio financeiro disponibilizado para realização da pesquisa e aos revisores do Anuário do IGEO – UFRJ pela indispensável contribuição

realizada ao manuscrito por meio de alto critério qualitativo.

7 Referências

- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B. & Fuck, R. 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: VIII SIMÓCIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, Campina Grande, Atas, p. 363-391.
- Amaral, W.S. 2007. *Integração de Dados Aerogeofísicos e Geológicos e sua Contribuição à Evolução Geodinâmica do Domínio Ceará Central, Província Borborema*. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 165p.
- Andrade, L.B.; Silva, A.M. & Souza Filho, C.R. 2014. Nickel Prospective Modelling Using Fuzzy Logic On Nova Brasilândia Metasedimentary Belt, Rondônia, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 32(3): 419-431.
- Araújo, C.E.G.; Píneo, T.R.G.; Caby, R.; Costa, F.G.; Cavalcante, J.C.; Vasconcelos, A.M. & Rodrigues, J.B. 2010. Provenance of the Novo Oriente Group, southwestern Ceará Central Domain, Borborema Province (NE-Brazil): A dismembered segment of a magma-poor passive margin or a restricted rift-related basin? *Gondwana Research*, 6: 265-273.
- Araújo, C.E.G.; Píneo, T.R.G.; Calado, B.O.; Gomes, I. & Cavalcante, J.C. 2011. Mapa Geológico da Folha Novo Oriente – SB.24-V-C-VI do Estado do Ceará e Piauí. 1 Mapa. Escala 1:100.000.
- Arthaud, M.H.; Caby, R.; Fuck, R.A.; Dantas, E.L. & Parente, C.V. 2008. Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: PUNCKHURST, R.J.; TROUW, R.A.J.; BRITO NEVES, B.B. & WIT, M.J. (Eds), *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the Atlanti Region*. Geological Society, London, special publications, 294, p. 49-67.
- Arthaud, M.H. 2007. *Evolução Neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil), da Sedimentação à Colisão Continental Brasileira*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 170p.
- Bennett, S.A.; Atkinson, W.W.; Kruse, F.A. 1993. Use of Thematic Mapper Imagery to Identify Mineralization in The Santa Teresa District, Sonora, México. *International Geology Review*, 35: 1009-1029.
- 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*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 229 p.
- Bonham-Carter, G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geocientists: Modelling with GIS*. Ontario, Pergamon Press, 398 p.
- Carrino, T.A.; Silva, A.M.; Botelho, N.F. & Silva, A.A.C. 2011. Lógica Fuzzy e Técnica SAM Para Modelagem Previsional do Ouro no Setor Oeste da Província Mineral do Tapajós Usando Dados Aerogeofísicos e de Sensoriamento Remoto. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29(3):535-554.
- Cox, K.G.; Bell, J.D. & Pankhurst, R.J. 1979. *The interpretation of igneous rocks*. Londres: George Allen & Unwin, 450p.
- Crósta, Á.P. 1992. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. São Paulo: Rev. Campinas, 170 p.
- Dantas, A.S.L.; Carvalho, F.P.; Rocha Neto, M.B.; Mendes, J.R.; Silva, A.R.A.; Schobbenhaus, C.; Mourão, L.M.F.; Ponte, M.X.; Pereira, H.; Camargo, M.A.; Nava, D.B.; Capeletti, I.; Temoteo, J.W.C. & Costa, I.V.G. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Projeto Aerogeofísico Novo Oriente. *Programa Geologia do Brasil. MME, SGM/TM*, 1: 1-231.
- Dickin, A.D. 1995. *Radiogenic Isotope Geology*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 490p.
- Ducart, D.F.; Crosta, Á. P & Souza Filho, C.R. 2005. Mapeamento de Alteração Hidrotermal no Distrito Los Menucos, Argentina, por Meio de Imagens Multiespectrais ASTER. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia, Brasil, p. 4057-4064.
- Faure, G. 1997. *Principles and applications of geochemistry*. Nova York: Prentice Hall, 589p.
- Ferreira, I.G.N. 2008. *Aspectos geológicos, estruturais e geocronológicos as sequencias metavulcano-sedimentar de Novo Oriente – CE*. Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Dissertação de Mestrado, 103p.
- Grasty, R.L.; Glyn, J.E. & Grant, J.A. 1985. The analysis of multichannel airborne gamma-ray spectra. *Geophysics*, 50(12): 2611-2620.
- Loughlin, W.P. 1991. Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57: 1163-1169.
- Minty, B.R.S. 1991. Simple Micro-Levelling for Aeromagnetic Data. *Exploration Geophysics*, 22:591-592 p.
- Pitombeira, J.P.A.; Amaral, W.S.; Uchôa Filho, E.C.; Fuck, R.A.; Dantas, E.L.; Parente, C.V.; Costa, F.G. & Veríssimo, C.U.V. 2017. Vestiges of a continental margin

- ophiolite type in the Novo Oriente region, Borborema Province, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 73: 78-99.
- Ribeiro, V.B.; Mantovani, M.S.M. & Louro, V.H.A. 2014. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terra Didática*, 10(1): 29-51.
- Salles, R.R. 2011. *Prospecção Uranífera: Modelagem Geoestatística e Integração de Assinaturas Aeroradiométricas com Base no Modelo de Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR Mary Kathleen, Nw de Queensland, Austrália*. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 121p.
- Tsoukalas, L.H. & Uhrig, R.E. 1997. Fuzzy and neural approaches in engineering. New York: *John Wiley and Sons Inc*, 587 p.
- Uchoa, E.B. & Castro, N.A. 2011. Processamento Digital de Imagens: Análise em Componentes Principais – ACP (Técnica de Crósta) e Razão de Bandas Landsat – TM para Realçar Mármore e/ou Minerais Carbonáticos do Município de Independência – CE. *Revista de Geologia*, 24(1): 28-35.
- Zacchi, E.N.P.; Silva, A.M. & Rolim, V.K. 2010. Análise Integrada de Dados Multifonte e sua Aplicação no Mapeamento Geológico das Formações Ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(4): 643-656.