



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS E DE SENSORES REMOTOS

APLICADA À PROSPECÇÃO NO

DISTRITO FERRÍFERO NOVA AURORA, MINAS GERAIS

AUTORA: Eliane Voll

ORIENTAÇÃO: Prof. Antônio Carlos Pedrosa Soares
Prof^a. Adalene Moreira Silva (UnB)

Nº 149

**BELO HORIZONTE
13/2/2015**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS E DE SENSORES
REMOTOS APLICADA À PROSPECÇÃO NO
DISTRITO FERRÍFERO NOVA AURORA, MINAS GERAIS**

por

Eliane Voll

Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Geologia Econômica

Orientador: Prof. Antônio Carlos Pedrosa Soares

Co-orientadora: Prof^a. Adalene Moreira Silva (UnB)

Belo Horizonte, 13 de fevereiro de 2015

V923i
2015

Voll, Eliane.

Integração de dados aerogeofísicos e de sensores remotos aplicada à prospecção no distrito ferrífero Nova Aurora, Minas Gerais [manuscrito] / Eliane Voll. – 2015.

78 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Antônio Carlos Pedrosa-Soares.

Coorientadora: Adalene Moreira Silva.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2015.

Área de concentração: Geologia Econômica.

Bibliografia: f. 74-78.

1. Minérios de ferro – Minas Gerais – Teses. 2. Lógica difusa – Teses. 3. Modelagem geológica – Teses. I. Pedrosa-Soares, Antônio Carlos. II. Silva, Adalene Moreira. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 553(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



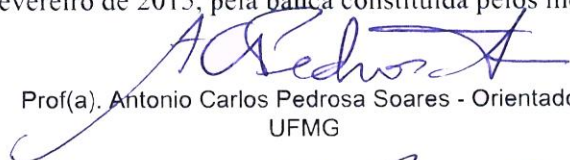
FOLHA DE APROVAÇÃO

INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS E DE SENSORES REMOTOS APLICADA À PROSPECÇÃO NO DISTRITO FERRÍFERO NOVA AURORA, MINAS GERAIS

ELIANE VOLL

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

Aprovada em 13 de fevereiro de 2015, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Antonio Carlos Pedrosa Soares - Orientador
UFMG


Prof(a). Matheus Kuchenbecker
UFVM


Prof(a). Ricardo Diniz da Costa
UFMG

Belo Horizonte, 13 de fevereiro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marlene e Hans (*in memoriam*) pelo apoio incondicional e contínuo.

À minha filha Karin, minha eterna motivação, por ser quem é.

Ao Professor Antônio Carlos Pedrosa Soares, orientador deste trabalho, sempre presente, pela atenção e cuidado constantes.

À Professora Adalene Moreira Silva, co-orientadora, pelo auxílio no processamento dos dados geofísicos e pela orientação, sempre atenciosa.

Ao colega André Luiz Profeta, pelas discussões ao final do trabalho.

À Sul Americana de Metais, em especial aos geólogos Ranufo Arimatéia e Eduardo Santos, pelo apoio e pelos dados para elaboração do estudo de caso.

Ao programa de Pós-Graduação em Geologia da UFMG pela oportunidade de realização do trabalho.

À CODEMIG, por ceder os dados aerogeofísicos utilizados no trabalho.

Ao Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa - CPMTC - IGC - UGMG, pela infraestrutura cedida.



Observation



beer

Computation

$$\rho \frac{\partial^2 (\nabla \times u_i)}{\partial t^2}$$

GEOLOGY

Somewhere in between

GEOPHYSICS

Maps



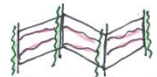
Hammers & optics



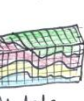
Rocks, volcanoes, earthquakes



Gore-Tex & hiking boots & beards...? (on men)



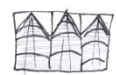
integrated interpretation



Models

MADE UP BY MATT

The stereotyped, hackneyed view of geology & geophysics ...the truth is in between



Shot records



Laptops & electronics

$$10110001100 \quad \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\omega \quad \mathbf{F} = m\ddot{\mathbf{u}}$$

digits, physics, math



Corduroy & tank tops & spectacles?

Matt Hall, 2015.

<http://earthscience.stackexchange.com/users/70/kwinkunks>

RESUMO

O Distrito Ferrífero Nova Aurora, localizado no norte de Minas Gerais, é composto por depósitos de ferro contidos em metadiamicritos do Grupo Macaúbas. Estes depósitos, englobados no Membro Riacho Poções da Formação Nova Aurora, são constituídos por metadiamicritos ricos em hematita e/ou magnetita como componentes da matriz, com teores de ferro entre 13% e 60%. Os metadiamicritos mineralizados em ferro têm distribuição aparentemente irregular e estão, em maior parte, recobertos pelos espessos solos elúvio-coluviais desenvolvidos em extensas chapadas que escondem a real dimensão lateral dos depósitos. De fato, a comparação entre dados de mapas geológicos, levantamentos aerogeofísicos e furos de sondagem revela que apenas uma pequena parte destes depósitos é aflorante. Este trabalho apresenta uma abordagem que integra dados geológicos, aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) e de sensoriamento remoto orbital, em plataforma SIG, sobre a área compreendida pelas folhas Padre Carvalho e Rio Pardo de Minas do Projeto Espinhaço (1:100.000), visando subsidiar a prospecção no Distrito Ferrífero Nova Aurora. Com os dados regionais e locais foram criados diversos modelos prospectivos que mostram áreas de maior favorabilidade para minério de ferro. No modelo regional, as áreas favoráveis se apresentam como manchas dispersas, sendo que as mais bem definidas e maiores se concentram nas regiões leste e centro-sul da região abordada (em coincidência com a densidade de distribuição dos processos minerários no DNPM). Os alvos onde campanhas de sondagem indicam vasta ocorrência de minério de ferro sob chapadas coincidem com áreas de maior favorabilidade do modelo. O modelo criado para o estudo de caso de área da Companhia Sul Americana de Metais (SAM) se mostrou coerente com o mapa geológico local elaborado pela empresa, com base em dados de campo e de centenas de furos de sondagem. Também se mostraram coerentes as profundidades estimadas para as fontes magnéticas geradas pela deconvolução de Euler, quando comparadas com as espessuras do corpo de minério mostradas nas seções geológicas controladas por furos de sonda. Os pontos de controle coletados em campo, para testar o ensaio, mostram correspondência entre o modelo e a ocorrência do minério aflorante. A grande extensão das coberturas elúvio-coluvionares mascaram as formações ferríferas nos produtos de geofísica gamaespectrométrica e naqueles gerados a partir das imagens do satélite Landsat 8, uma vez que estes sensores refletem somente a resposta do material superficial do terreno. O dado geofísico magnetométrico mostra informação referente a maiores profundidades mas, isolado, não é suficiente para delimitar de forma eficiente, em escala de detalhe, as áreas de maior favorabilidade à ocorrência de minério de ferro. A integração das informações mostrou que, mesmo considerando a grande extensão das coberturas na região, é possível restringir as áreas mais indicadas para prospecção.

Palavras-chave: Minério de ferro, Distrito Ferrífero Nova Aurora, Modelagem espacial, Lógica *Fuzzy*

ABSTRACT

The Nova Aurora Iron District (Northern Minas Gerais State, Brazil) comprises iron deposits associated with metadiamicrites of the Neoproterozoic Macaúbas Group. These deposits, included in the Riacho Poções Member, Nova Aurora Formation, consist of hematite and/or magnetite matrix-rich metadiamicrites, which iron content range from 13 to 60 wt% Fe. They show irregular distribution and are mostly covered by the thick lateritic soils exposed on extensive plateaus, hiding their real lateral dimensions. This paper presents a geological, geophysical and remote sensing integrated study with the aim to support mineral prospecting from regional to local scale. The regional model show scattered favorable areas, with several high density concentration of probable iron ore deposits. In the local model, including field and borehole data, the Euler Deconvolution reveals magnetic source depths in agreement with the ore body thickness shown by borehole-controlled geological sections. This local integrated model also fits well with the iron ore outcrops visited in the field. The very extensive lateritic covers mask the lateral dimensions of the iron formations in gammaspectrometry and Landsat 8 images, since these sensors mainly reflect the surface response of ground material. Magnetometry data may reveal the most favorable targets for iron ore prospecting, although it lacks enough detail for more specific studies. Integrated models may better constrain prospecting targets, even in the extensive plateau areas.

Keywords: Iron Ore; Spatial modeling; *Fuzzy* Logic; Macaúbas Group.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	2
3. CONTEXTO GEOLÓGICO	4
3.1. O Distrito Ferrífero Nova Aurora, Norte de Minas Gerais	7
3.2. Geologia do Distrito Ferrífero Nova Aurora	9
3.3. Depósitos de Ferro da Formação Nova Aurora	11
3.3.1. Metadiamicrito Encaixante (ou Regional)	11
3.3.2. Litotipos do Membro Riacho Poções.....	12
4. MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1. Mapas geológicos	16
4.2. Levantamento aerogeofísico: magnetometria e gamaespectrometria	16
4.2.1. Processamento dos dados geofísicos magnetométricos	18
4.2.1.1. Testes de consistência.....	20
4.2.1.2. Campo magnético anômalo (CMA).....	20
4.2.1.3. Espectro radial de potência	20
4.2.1.4. Derivadas horizontais e vertical.....	22
4.2.1.5. Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT)	22
4.2.1.6. Inclinação do sinal analítico (ISA).....	23
4.2.1.7. Amplitude do sinal analítico (ASA)	24
4.2.1.8. Domínios magnéticos.....	25
4.2.1.9. Lineamentos magnéticos.....	26
4.2.1.10. Deconvolução de Euler	27
4.2.2. Processamento dos dados geofísicos gamaespectrométricos.....	28
4.2.2.1. Composição ternária e domínios gamaespectrométricos	29
4.2.2.2. Razões entre os canais gamaespectrométricos.....	31
4.3. Imagem de satélite Landsat 8	32
4.3.1. Razões entre bandas e composições coloridas.....	34
4.3.2. Análise por componentes Principais.....	35
4.3.3. Índice para realce de hematita	37
4.4. Modelo digital de terreno: SRTM	37
4.5. Modelagem espacial	38
4.5.1. Formação ferrífera Diamictítica.....	38
4.5.2. Modelos guiados pelo conhecimento.....	39
4.5.3. Modelagem dos dados	40
5. ARTIGO SUBMETIDO A “GEOLOGIA USP – SÉRIE CIENTÍFICA” (QUALIS-CAPES B2)	45
RESUMO	45
ABSTRACT	45
1. INTRODUÇÃO	46
2. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS:	46
3. CONTEXTO GEOLÓGICO	47
3.1. O Distrito Ferrífero Nova Aurora, norte de Minas Gerais	47

3.2. Geologia do Distrito Ferrífero Nova Aurora	49
3.3. Depósitos de Ferro da Formação Nova Aurora	49
3.3.1. Metadiamicrito Encaixante (ou Regional)	50
3.3.2. Litotipos do Membro Riacho Poções.....	51
4. MATERIAL E MÉTODOS	52
4.1. Mapas geológicos	52
4.2. Levantamento aerogeofísico: magnetometria e gamaespectrometria	52
4.2.1. Processamento dos dados geofísicos magnetométricos	52
4.2.2. Processamento dos dados geofísicos gamaespectrométricos.....	56
4.3. Imagem de satélite Landsat 8	58
4.3.1. Análise por Componentes Principais	59
4.3.2. Índice para realce de hematita.....	59
4.4. Modelo digital de terreno: SRTM	60
4.4.1. Modelos guiados pelo conhecimento.....	60
4.4.2. Modelagem dos dados.....	61
5. APLICAÇÃO LOCAL DOS MÉTODOS E RESULTADOS	62
5.1. Caracterização da área do estudo de caso	63
5.2. Caracterização geológica	63
5.3. Interpretação dos dados geofísicos e de sensoriamento remoto	64
5.3.1. Amplitude do Sinal Analítico	64
5.3.2. Deconvolução de Euler	65
5.3.3. Índice de realce da hematita.....	65
5.3.4. Laterita e colúvios.....	65
5.3.5. Composição ternária K-Th-U	66
5.3.6. Modelagem espacial.....	66
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS:	68
7. CONCLUSÃO	68
8. AGRADECIMENTOS	69
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	72
7. CONCLUSÃO	72
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTAS DE FIGURAS

CORPO DO TEXTO

- Figura 1.** Localização da área de estudo. 2
- Figura 2.** Mapa hipsométrico da região estudada mostrando as áreas ocupadas pelas bacias hidrográficas do Rio São Francisco, do Rio Pardo e do Rio Jequitinhonha (áreas delimitadas em vermelho). 3
- Figura 3.** Mapa geológico do Orógeno Araçuaí, com indicação das principais concentrações de depósitos minerais (Vilela *et al.* 2014). 5
- Figura 4.** Mapa da distribuição das formações do Grupo Macaúbas (Pedrosa-Soares et al. 2007, 2011b). Os blocos indicados são áreas de exposição predominante do embasamento arqueano-paleoproterozoico. 6
- Figura 5.** Mapas geológico e magnetométrico (amplitude do sinal analítico) da área coberta pelas folhas Padre Carvalho, a sul, e Rio Pardo de Minas a norte. As cartas geológicas são de Mourão *et al.* (1996) e Roque et al. (1996). Os dados magnetométricos são da Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG, Área 8, 2006). 8
- Figura 6.** Estruturas de rochas da Formação Nova Aurora (indica-se a direção E-W na foto inferior): A, metadiamicrito hematítico, mostrando estiramento de seixos de carbonato (creme a ocre), quartzito e quartzo leitoso; B, metadiamicrito hematítico com intercalações de quartzito que marcam a estratificação reliquiar, à qual se paraleliza a xistosidade regional S_1 que, de forma mais nítida na porção cinza (rica em hematita), é cortada pela foliação de crenulação S_2 (observar, logo acima da escala, que lâminas quartzíticas e seixos estão transpostos na direção de S_2); C, fotomicrografia de metapelito, mostrando a relação entre as foliações S_1 e S_2 (nicóis cruzados). Fonte: Vilela *et al.* 2014. 10
- Figura 7.** Fotomicrografias do metadiamicrito hematítico em luz refletida: A, hematita especular fina ao longo da foliação S_1 , anastomosada, envolvendo outros componentes da matriz (predominantemente quartzo recristalizado e rara hematita granular); B, concentração de hematita especular fina em lâminas S_1 (neste caso, a menor quantidade e menor tamanho dos minerais da ganga permitem uma orientação mais uniforme da especularita); C, concentração e recristalização de especularita grossa em lâminas S_2 , intercaladas com lâminas pobres em hematita; D, transposição de S_1 por S_2 , mostrando recristalização de hematita especular grossa em S_2 ; E, porfiroblasto de magnetita martitizada, estirado e subgranulado, com cauda de recristalização de especularita; F, porfiroblasto idiomórfico de magnetita martitizada, isolado na matriz do metadiamicrito hematítico. Fonte: Vilela *et al.* 2014. 14
- Figura 8.** Fotomicrografias do metadiamicrito magnetítico: A (luz transmitida, nicóis paralelos), B (luz refletida); tomadas do mesmo local, mostrando porfiroblastos deformados de magnetita grossa (> 1mm), parcialmente martitizados, envoltos por quartzo e muscovita que marcam a xistosidade S_1 ; C (luz transmitida, nicóis paralelos), D (luz refletida); tomadas do mesmo local, mostrando porfiroblastos euédricos a subédricos de magnetita em matriz rica em clorita (esverdeada); E (luz transmitida, nicóis paralelos), F (luz refletida); tomadas do mesmo local, magnetita euédrica a subédrica, de granulação fina a média (< 0,3 mm), disseminada em matriz rica em quartzo. Fonte: Vilela *et al.* 2014. 15
- Figura 9.** Mapa geológico das folhas Padre Carvalho e Rio Pardo de Minas, do Projeto Espinhaço (Modificado de Mourão *et al.* 1996 e Roque *et al.* 1996). 17
- Figura 10.** Área de recobrimento do levantamento aerogeofísico da Área 8 – Minas Novas-Riacho dos Machados-Espinosa (CODEMIG-SEDE-CPRM 2006), mostrando a área de interesse dessa dissertação. 18
- Figura 11.** Fluxograma de processamento dos dados magnetométricos 19

Figura 12. Mapa do campo magnético anômalo (CMA) da área estudada.....	21
Figura 13. Espectro radial de potência identificando quatro grupos de fontes magnéticas.	22
Figura 14. Derivadas horizontais em relação aos eixos x (a) e y (b) e derivada vertical (c) para a região de estudo.....	23
Figura 15. Amplitude do gradiente horizontal total (a) e inclinação do sinal analítico (b) sobre a área de estudo.....	24
Figura 16. Domínios magnéticos interpretados sobre a área de estudo (domínios magnéticos, à esquerda, e domínios magnéticos sobre a imagem de amplitude do sinal analítico, à direita).....	25
Figura 17. Amplitude do sinal analítico simbolizada em 2,5 dimensões, utilizando a intensidade de sinal como valor da variável z, associada aos limites dos domínios magnéticos identificados.....	26
Figura 18. Lineamentos magnéticos na área de estudo, interpretados sobre a derivada em x (a) em y (b), em z (c) e mostrando as interpretações sobre as três direções (d), em vermelho sobre dx, em verde sobre dy e em azul sobre dz.	26
Figura 19. Resultado do processamento da deconvolução de Euler, mostrando soluções e as profundidades estimadas das fontes magnéticas para a áreas de detalhe 'a' e 'b', sobrepostas pelos lineamentos magnéticos interpretados. ...	28
Figura 20. Fluxograma de processamento dos dados gamaespectrométricos.	29
Figura 21. Domínios gamaespectrométricos sobre a área de estudo, resultado de interpretação visual (a), classificação supervisionada (b) e composição ternária criada a partir dos canais de potássio, tório e urânio.	30
Figura 22. Resultado do cálculo das razões entre os canais de tório e potássio (a), entre urânio e potássio (b), composição ternária criada a partir dos canais de potássio, tório e urânio (c) e composição ternária criada a partir do canal de potássio e das razões entre os canais de tório e potássio e entre os de urânio e potássio(d).	32
Figura 23. Imagem Landsat 8 sobre a área de estudo (banda 4), mostrando as imagens utilizadas para este trabalho (218/71 e 217/71) e no detalhe a localização da área de trabalho sobre elas (RPM - Folha Rio Pardo de Minas, PC - Folha Padre Carvalho)	33
Figura 24. Gráfico mostrando as posições das bandas do satélite Landsat 8 no espectro eletromagnético e as curvas espectrais da hematita, vegetação de campo seco e vegetação densa (USGS 2013).....	34
Figura 25. Fluxograma mostrando os produtos gerados a partir da imagem Landsat 8 (B4/B2, B5/B2 e B5/B4: razões entre bandas; R7G6B5 e R7G5B2: composições coloridas; APC-B2B4 e APC-B6B7: análise por componentes principais entre as bandas; IH: índice para realce de hematita).	34
Figura 26. Composições coloridas das bandas 567 (a) e 752 (b) do satélite Landsat 8, onde alvos ricos em óxidos ou hidróxidos de ferro estão representados nas áreas em cor ciano (a) ou magenta (b). Composição colorida das razões de bandas 4/2, 5/2 e 6/4 do satélite Landsat 8, onde alvos ricos em óxidos ou hidróxidos de ferro estão representados nas áreas em cor vermelha (c).	35
Figura 27. Análise de Componente Principal seletiva para realce de Óxido-Hidróxido de Ferro (a), argilo-minerais (b) e índice de realce para hematita em solo (c).....	37
Figura 28. Fluxograma de processo para análise para geração prospectivo para minério de ferro, baseado em modelo guiado pelo conhecimento utilizando-se lógica <i>Fuzzy</i>	42
Figura 29. Gráfico mostrando os resultados da função <i>Fuzzy gama</i> em relação à variação do índice γ , quando combinada uma série de imagens μ_i (com $i=1...n$, sendo μ_{\min} e μ_{\max} os valores mínimo e máximo em um ponto, modificado de Bonham-Carter, 1994).	43

Figura 30. Modelo prospectivo para minério de ferro (à esquerda) mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção em vermelho. A) Requerimentos de lavra (amarelo), autorizações de pesquisa (laranja), requerimentos de pesquisa (verde) e áreas em disponibilidade (rosa) para minério de ferro sobre a região de estudo. B) Afloramento de metadiamicrito hematítico, mostrando bandamento (S0) paralelo à foliação S1 (linha branca – S0//S1) e hematita concentrada em S2 (linha amarela), discordante de S0//S1 (Vilela 2010). C) Metadiamicrito hematítico com alta concentração de hematita especular (UTM23S-WGS84 740.468E, 8.201.919N)..... 44

ARTIGO

Figura 1. Mapa hipsométrico da região estudada mostrando as áreas ocupadas pelas bacias hidrográficas do Médio Rio São Francisco, do Rio Pardo e do Rio Jequitinhonha (áreas delimitadas em vermelho).	47
Figura 2. Mapa da distribuição das formações do Grupo Macaúbas (modificado de Pedrosa-Soares <i>et al.</i> 2011). Os blocos indicados são áreas de exposição predominante do embasamento. Em vermelho, localização da área de estudo.....	48
Figura 3. Mapa geológico das folhas Padre Carvalho e Rio Pardo de Minas, do Projeto Espinhaço (modificado de Mourão <i>et al.</i> 1996 e Roque <i>et al.</i> 1996).	50
Figura 4. Campo magnético anômalo (CMA) gerado para a área de estudo.	53
Figura 5. Espectro radial de potência para a região estudada.	54
Figura 6. Derivadas horizontais (a) e (b) e vertical (c) para a região de estudo.....	54
Figura 7. Domínios magnéticos interpretados para a área de estudo: à esquerda, domínios magnéticos; à direita, limites dos domínios magnéticos sobre a imagem ASA.....	55
Figura 8. Amplitude do sinal analítico simbolizada em dimensão 2,5 (intensidade de sinal como valor de Z), associada aos limites dos domínios magnéticos.....	55
Figura 9. Lineamentos magnéticos na área de estudo, interpretados sobre a derivada em X (a), Y (b), e Z (c), e mostrando as interpretações sobre as três direções (d: em vermelho sobre dx, em verde sobre dy e em azul sobre dz).	55
Figura 10. Resultado do processamento da Deconvolução de Euler, mostrando soluções e as profundidades estimadas das fontes magnéticas para a áreas de detalhe 'a' e 'b', sobrepostas pelos lineamentos magnéticos interpretados. ...	56
Figura 11. Domínios gamaespectrométricos da área de estudo: a) interpretação visual, b) classificação supervisionada, c) composição ternária.	57
Figura 12. Resultado do cálculo das razões entre os canais de (a) Th e K, (b) U e K, e (c) composição ternária dos canais de K, Th e U, e (d) composição ternária a partir do canal de K e razões entre os canais de Th e K, e de U e K.	58
Figura 13 - Imagens Landsat 8 sobre a área de estudo (218/71 e 217/71, banda 4). RPM, Folha Rio Pardo de Minas, PC, Folha Padre Carvalho).	59
Figura 14. Posições das bandas do Landsat 8 no espectro eletromagnético, em relação às curvas espectrais da hematita, campo seco e vegetação densa (USGS, 2013).	59
Figura 15. Análise por componente principal seletiva para realce de (a) óxido-hidróxido de ferro, (b) argilo-minerais e (c) índice de teor de hematita em solo.	60

Figura 16. Fluxograma de processo para análise visando geração de modelo prospectivo para minério de ferro, baseado em modelo guiado pelo conhecimento utilizando-se lógica <i>Fuzzy</i>	61
Figura 17. Modelo prospectivo regional para minério de ferro (mapa maior, à esquerda), mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção (em vermelho). A) Mapa com a localização dos requerimentos de lavra (amarelo), autorizações de pesquisa (laranja), requerimentos de pesquisa (verde) e áreas em disponibilidade (rosa) para minério de ferro. B) Afloramento de metadiamicrito hematítico, mostrando acamamento sedimentar (S_0) paralelo à foliação S_1 (linha branca, S_0/S_1), e hematita concentrada em S_2 (linha amarela), discordante de S_0/S_1 (Vilela 2010). C) Metadiamicrito hematítico com alta concentração de hematita especular.	62
Figura 18. Localização das áreas de requerimento de lavra da SAM (DNPM 2014), sobre o mapa geológico regional (Mourão <i>et al.</i> 1996) e sobre a região focalizada.....	63
Figura 19. Mapa geológico (sem coberturas) da área do estudo de caso (modificado de Vilela 2010 e SAM 2013).....	64
Figura 20. Metadiamicrito hematítico (UTM23S-WGS84, 741.246E, 8.201.332N).....	64
Figura 21. Bloco de formação ferrífera rica em hematita especular (“Marco Zero”), aflorante no topo da chapada (UTM23S-WGS84, 740.468E, 8.201.919N).	65
Figura 22. Mapa de soluções da Deconvolução de Euler, associado à amplitude do sinal analítico. Visualização das profundidades das soluções de Euler sobre o mapa geológico: a) visada NW; b) visada EW.....	65
Figura 23. a) composição colorida r4g3b2 (cores naturais) da imagem Landsat 8 (aquisição em 21/5/2013) mostrando a geomorfologia da área com as coberturas que sustentam o relevo circundadas por vales onde afloram as rochas da Formação Nova Aurora; b) amplitude do sinal analítico, exibindo as anomalias magnéticas positivas sobre as áreas da SAM; c) índice para realce de hematita, sugerindo alta concentração de hematita nas áreas onde há solo exposto; d) razão Th/K, mostrando as altas concentrações de tório sobre as coberturas; e) razão U/K, mostrando a maior concentração de urânio nos colúvios que circundam as coberturas; f) composição ternária de K-Th-U.	66
Figura 24. Fluxograma de processo para análise para geração de modelo prospectivo para minério de ferro, baseado em modelo guiado pelo conhecimento utilizando-se lógica <i>Fuzzy</i> para a área de pesquisa da SAM.....	67
Figura 25. Mapa 1: modelo prospectivo para minério de ferro, mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção em vermelho e localização dos pontos A, B, C e D (afloramentos de metadiamicrito hematítico descritos em campo). Mapa 2: modelo prospectivo para minério de ferro, mostrando as áreas de requerimento de lavra da SAM e os limites da unidade que contém o minério. A, B, C e D: afloramentos de metadiamicrito hematítico (A - UTM23S-WGS84 741.246E, 8.201.332N; B - UTM23S-WGS84 740.468E, 8.201.919N; C - UTM23S-WGS84 740.858E, 8.203.248N; D - UTM23S-WGS84 742.962E, 8.203.719N).	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos magnéticos e seus respectivos índices estruturais (N).....	27
Tabela 2 - Parâmetros básicos da imagem OLI e TIRS do satélite Landsat 8	33

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O Distrito Ferrífero Nova Aurora, localizado no norte de Minas Gerais, é composto por depósitos de ferro contidos em metadiamicititos do Grupo Macaúbas. Estes depósitos são constituídos por metadiamicititos ricos em hematita e/ou magnetita como componentes da matriz, com teores de ferro entre 13% e 60%. Com distribuição aparentemente irregular, estão, em maior parte, recobertos por espessos solos elúvio-colúviais desenvolvidos em extensas chapadas que escondem a real dimensão lateral dos depósitos. Neste trabalho é apresentada a integração de dados geológicos, aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) e de sensoriamento remoto orbital, em plataforma SIG, com foco na prospecção no Distrito Ferrífero Nova Aurora. Com os dados regionais e locais foram criados e avaliados modelos prospectivos que mostram áreas de maior favorabilidade para ocorrência de minério de ferro.

A área de estudo está inserida na região norte do Estado de Minas Gerais, limitada pelas latitudes 15°30'S e 16°30'S e as longitudes 42°30'W e 43°00'W, correspondendo às folhas em escala 1:100.000 Padre Carvalho (SE.23-X-B-II) e Rio Pardo de Minas (SD.23-Z-D-V). O limite oeste da área está a norte de Belo Horizonte, a 532km por estrada asfaltada. O acesso se dá pela BR-040 em direção a norte a partir de Belo Horizonte, por onde se segue por 109km. A partir deste ponto, tona-se a BR-135 por 300km, até a cidade de Montes Claros, passando pelas cidades de Corinto e Bocaiúva. O limite oeste da área se encontra a 110km a leste da cidade de Montes Claros pela BR-251 (Figura 1).

Esta área apresenta dois domínios geomorfológicos distintos. Na parte oeste situa-se o domínio da Serra do Espinhaço, sustentada por quartzitos do supergrupo homônimo. Nas porções central e leste se encontra o domínio dos chapadões sustentados por unidades ricas em metadiamicititos do Grupo Macaúbas. É neste domínio que se concentram os depósitos de ferro relacionados a metadiamicititos do Grupo Macaúbas, compondo o Distrito Ferrífero Nova Aurora.

Os depósitos encontram-se no Membro Riacho Poções da Formação Nova Aurora, Grupo Macaúbas (Figura 2), e são genericamente constituídos por metadiamicititos ricos em hematita e/ou magnetita como componentes da matriz, com teores de ferro entre 13 e 60%_{peso} (Viveiros *et al.* 1978, Grossi-Sad *et al.* 1997, Vilela 2010, Pedrosa-Soares *et al.* 2011, Vilela *et al.* 2014).

Em termos econômicos, o Distrito Ferrífero Nova Aurora tornou-se, nos últimos anos, um importante alvo para a pesquisa de minério de ferro, como se constata pelas diversas empresas hoje ativas na região (VALE, SAM, MIBA e outras) e pelos noticiários sobre atividades do setor mineral.

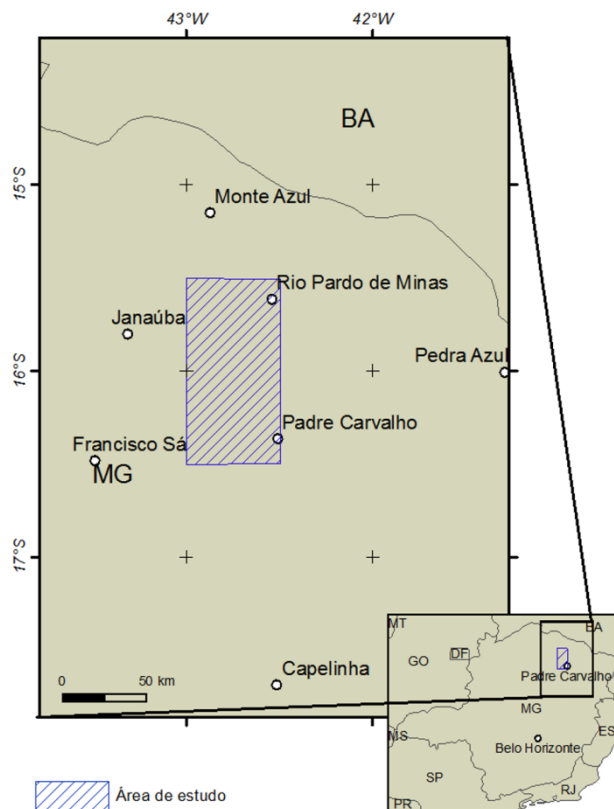


Figura 1. Localização da área de estudo.

Foram identificadas as principais ocorrências de minério de ferro conhecidas na região e analisados os alvos com maior potencialidade econômica, com a finalidade de restringir a área de pesquisa.

A proposta para este trabalho é a criação de modelo prospectivo para minério de ferro na região estudada. Com esta finalidade, foram aplicadas técnicas de processamento e análise integrada dos dados aerogeofísicos de alta densidade de amostragem, modelo digital de terreno, além de processamento de dados de sensoriamento remoto orbital, informação de campo e dados históricos de mapeamento geológico. Esta série de dados foi processada para se identificar e selecionar os produtos mais adequados para a geração do modelo prospectivo.

2. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

A área estudada situa-se na confluência dos divisores de águas das bacias dos rios São Francisco, Pardo e Jequitinhonha. A Bacia do Médio São Francisco está na porção noroeste da área, enquanto que a bacia do Rio Pardo se encontra na porção nordeste. Seu divisor de águas, de direção NS, é a Serra do Espinhaço. A Bacia do Rio Jequitinhonha está ao sul destas duas e seu divisor de águas situa-se sobre as grandes chapadas da região (Figura 2).

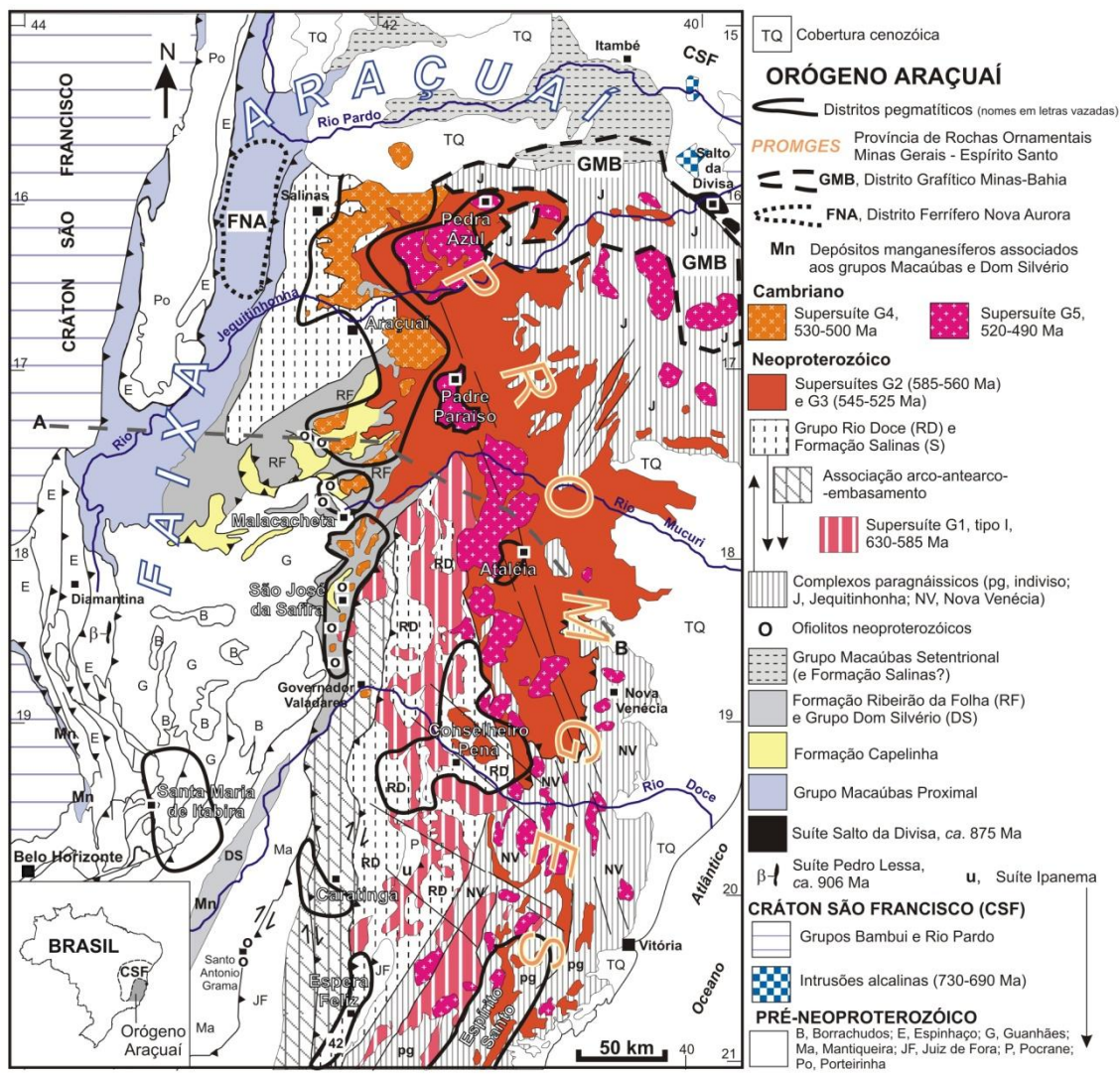
A maior parte da área estudada está contida no "Compartimento Morfoestrutural 1", correspondente ao Planalto da Serra do Espinhaço, resultante do aplainamento que resultou na "Superfície Sulamericana" (King 1956), que se desenvolveu sobre a parte do Grupo Macaúbas rica em metadiamicititos (Saadi & Pedrosa Soares 1990). King (1956) definiu o conjunto de chapadas e

ocorrem essencialmente sobre rochas do Grupo Macaúbas (Figura 3). Estas chapadas estão sendo dissecadas por drenagens perenes e intermitentes, formando ravinas, onde podem aflorar as rochas subjacentes. As áreas resultantes do “Ciclo Velhas”, entre os níveis de 500-700m, estão sobre rochas graníticas e gnáissicas da Suíte Rio Itacambiruçu e do Complexo Córrego do Cedro, a noroeste, e os vales encaixados dos rios Peixe Bravo e Ventania, afluentes do Rio Jequitinhonha. O compartimento denominado “Serras, Patamares e Escarpas do Espinhaço”, resultante do “Ciclo Pós-Gondwana”, com altitudes entre 1.200 e 1.300m, é representado o alinhamento norte-sul das serras da Bocaina e Geral.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Faixa Araçuaí se caracteriza como um cinturão de dobramentos e empurrões que marca o limite oriental do Cráton do São Francisco (Almeida 1977). Esta faixa constitui, juntamente com a região rica em rochas graníticas e de alto grau metamórfico que se estende rumo à margem atlântica, o Orógeno Araçuaí (Figura 3). Definições e sínteses sobre a estratigrafia regional, magmatismo, tectônica, metamorfismo, geocronologia e evolução do Orógeno Araçuaí encontram-se em Pedrosa-Soares *et al.* (2001, 2007, 2008, 2011a,b), Alkmim *et al.* (2006, 2007) e Pedrosa-Soares & Alkmim (2011), incluindo suas referências bibliográficas.

As unidades proximais do Grupo Macaúbas, as suítes magmáticas Salto da Divisa e Pedro Lessa (Machado *et al.* 1989, Silva *et al.* 2008) e o vulcanismo máfico contido na Formação Chapada Acauã Inferior registram o estágio de rifte continental da bacia precursora do Orógeno Araçuaí (Figuras 3 e 4). A sedimentação da fase rifte continental inclui os depósitos pré-glaciais e glaciogênicos do Grupo Macaúbas Proximal, cuja idade máxima de deposição é 900 ± 21 Ma (Babinski *et al.* 2012). A sedimentação glácio-marinha é mais espessa e extensa nas formações Nova Aurora e Chapada Acauã Inferior (Figura 4). A Formação Nova Aurora consiste, essencialmente, de metadiamicritos e metaturbiditos arenosos, com intercalações de formações ferríferas diamictíticas. Por sua vez, a Formação Chapada Acauã inferior é uma sucessão de metadiamicritos, metaturbiditos arenosos e metapelitos, com raras ocorrências de formações ferríferas diamictíticas. Os xistos verdes intercalados com metadiamicritos da Formação Chapada Acauã Inferior representam vulcanismo máfico transicional, originado na fase de rifte continental tardio da Bacia Macaúbas (Gradim *et al.* 2005). As formações Nova Aurora e Chapada Acauã Inferior são consideradas como equivalentes laterais (Noce *et al.* 1997), mas suas associações de litofácies são significativamente diferentes.



SEÇÃO ESQUEMÁTICA DO ORÓGENO ARAÇUAÍ (A--B, localização no mapa acima)

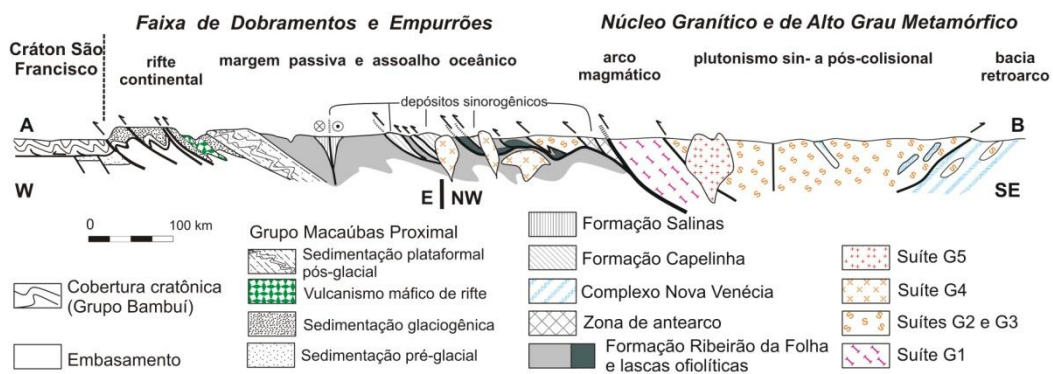


Figura 3. Mapa geológico do Orógeno Araçuaí, com indicação das principais concentrações de depósitos minerais (Vilela et al. 2014).

A evolução da abertura da bacia precursora levou à deposição da pilha sedimentar da margem continental passiva e à formação de litosfera oceânica. Este estágio é representado pelas unidades pós-glaciais do Grupo Macaúbas, pelo Grupo Dom Silvério e Complexo Jequitinhonha, e por corpos máfico-ultramáficos ofiolíticos (Figuras 3 e 4). A Formação Ribeirão da Folha, unidade distal do Grupo Macaúbas, e o Grupo Dom Silvério englobam sucessões metavulcano-sedimentares de assoalho oceânico, ricas em xistos peraluminosos com intercalações de metacherts e diopsiditos

sulfetados, formações ferríferas bandadas dos tipos óxido, silicato e sulfeto, e rochas metamáficas com assinatura MORB. Encaixa nesta formação ocorrem lascas tectônicas de rochas metamáficas com veios de plagiograno e de rochas metaultramáficas, caracterizando partes de ofiolitos tectonicamente desmembrados (Suíta *et al.* 2004). O magmatismo oceânico, que também inclui corpos metamáficos e metaultramáficos dos arredores de São José da Safira e Santo Antônio do Grama, marca um período de espalhamento oceânico entre ca. 660 e 600 Ma (Queiroga *et al.* 2007, Queiroga 2010).

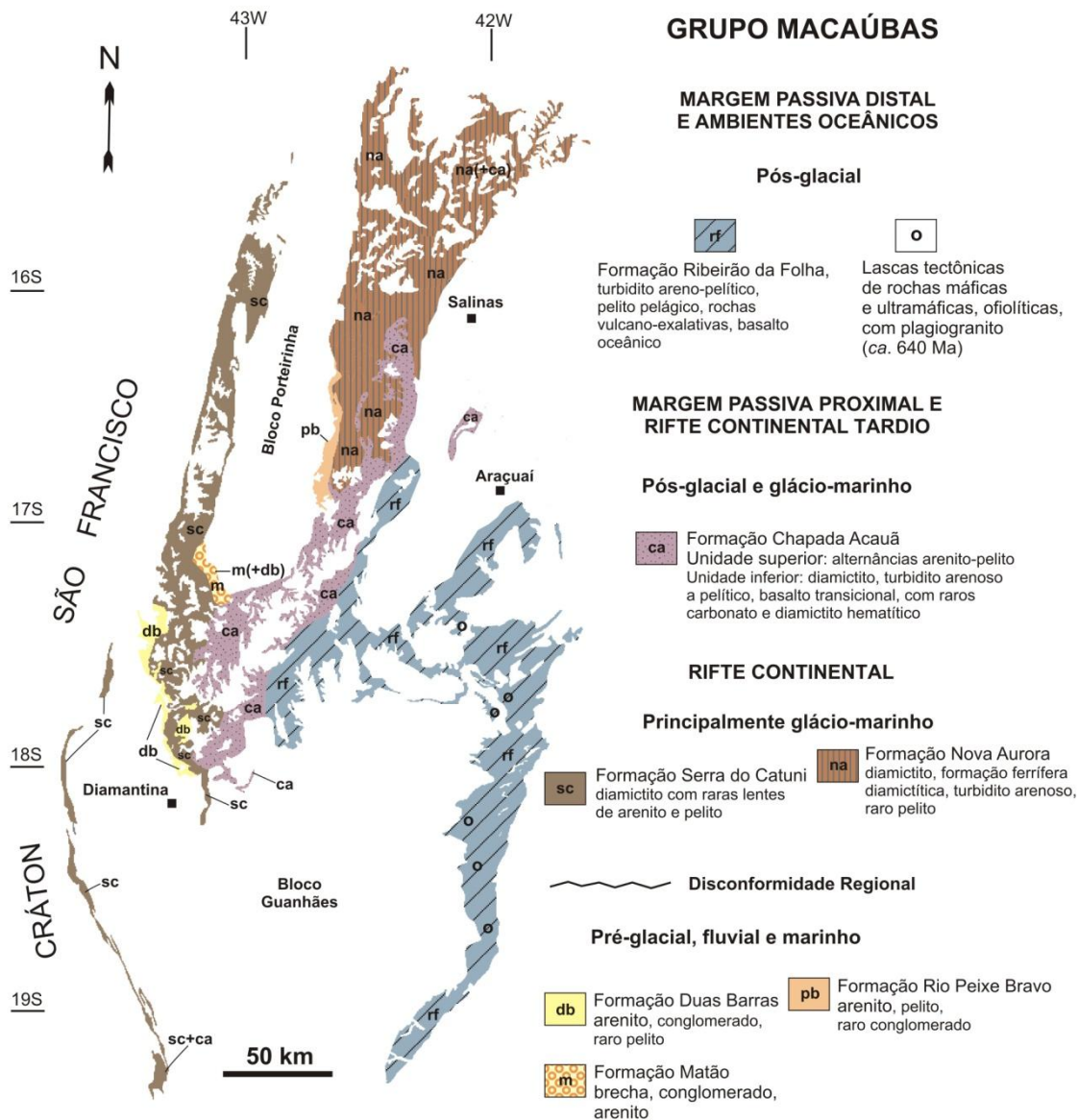


Figura 4. Mapa da distribuição das formações do Grupo Macaúbas (Pedrosa-Soares *et al.* 2007, 2011b). Os blocos indicados são áreas de exposição predominante do embasamento arqueano-paleoproterozoico.

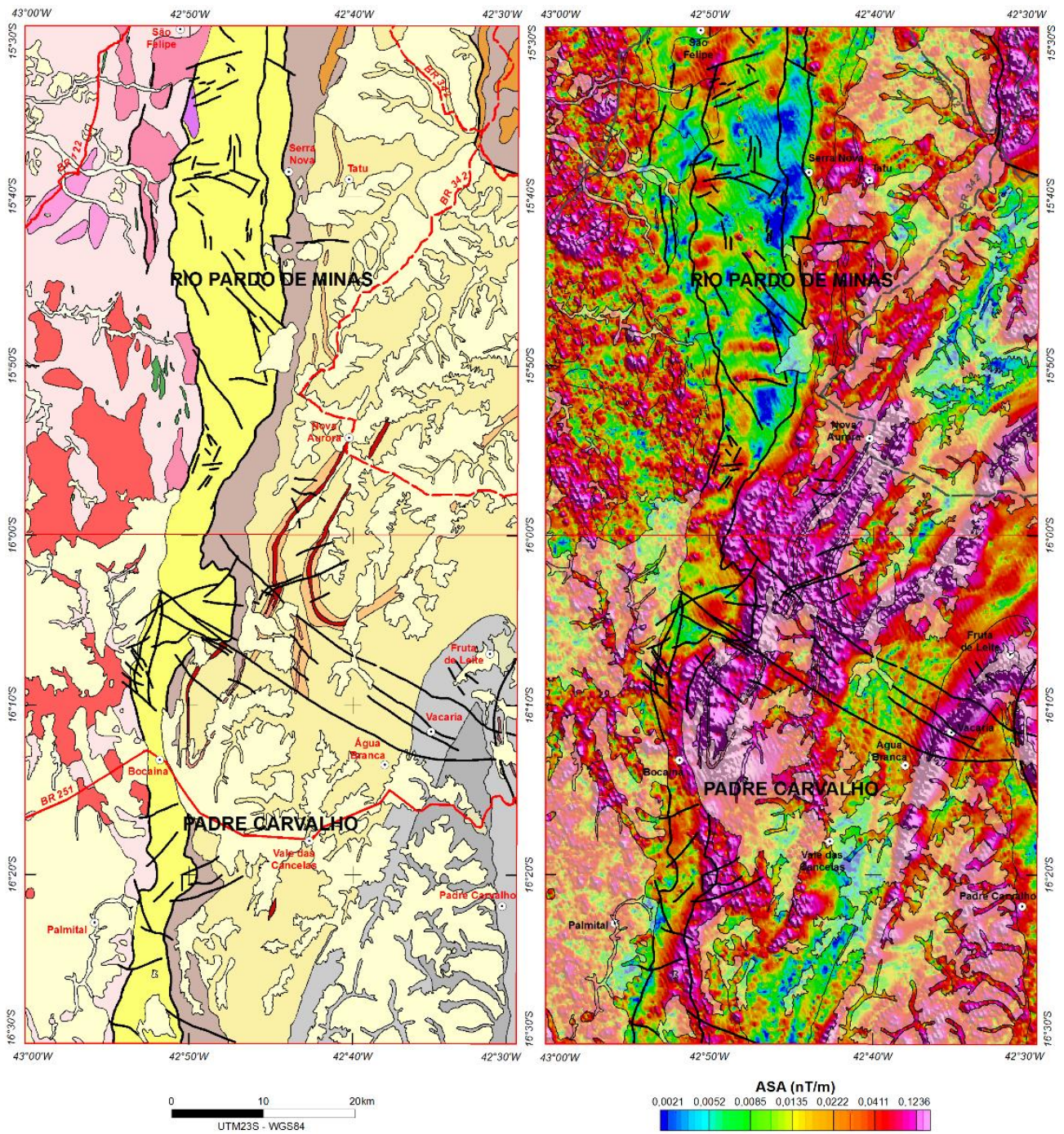
O Complexo Jequitinhonha é constituído de paragnaisse aluminosos a peraluminosos (kinzigíticos) com intercalações de grafita gnaisse, quartzito e rochas calcissilicáticas. Este complexo se correlaciona com as unidades pós-glaciais do Grupo Macaúbas, representando sedimentação de margem passiva (Gonçalves-Dias *et al.* 2011).

3.1. O Distrito Ferrífero Nova Aurora, Norte de Minas Gerais

Depósitos de ferro são conhecidos na região norte de Minas Gerais desde o início do século 20, mas os primeiros trabalhos prospectivos importantes datam da década de 1970 (Schobbenhaus 1972, Viveiros *et al.* 1978, Vilela 1986). Na área de ocorrência dos depósitos de ferro, o Grupo Macaúbas foi subdividido em formações Rio Peixe Bravo, basal, composta de quartzitos e metapelitos, e Nova Aurora, no topo, constituída de metadiamicititos, metadiamicititos ferruginosos, quartzito e raro metapelito (Viveiros *et al.* 1978). O Membro Riacho Poções, rico em metadiamicititos ferruginosos, foi individualizado como portador do minério de ferro da Formação Nova Aurora (Viveiros *et al.* 1978).

O mapeamento geológico sistemático da região foi realizado, em escala 1:100.000, no âmbito do Projeto Espinhaço (Grossi-Sad *et al.* 1997), quando foram mapeadas as folhas Padre Carvalho (Mourão *et al.* 1996) e Rio Pardo de Minas (Roque *et al.* 1996), onde se situa a área-tipo do Membro Riacho Poções (Figura 5). O mapeamento revelou pouco mais do que já se conhecia sobre a distribuição das formações ferríferas, em decorrência da presença de extensos chapadões cobertos por solos elúvio-coluvionares e da enorme dificuldade de acesso ao interior e bordas desses platôs na época de realização do projeto. Em tal situação geomorfológica, imagens dos mais diversos sensores remotos também pouco auxiliam para mapear a real extensão do Membro Riacho Poções.

Os levantamentos aerogeofísicos realizados pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG, Área 8, 2006) revelaram marcantes anomalias magnéticas, em parte correspondentes aos metadiamicititos ferruginosos e formações ferríferas do Membro Riacho Poções, inclusive onde estas rochas estão encobertas sob os chapadões da região (Figura 5). Isso levou a uma verdadeira “corrida do ferro” na região de tal forma que, hoje, são conhecidas em sub-superfície extensões muito maiores das camadas de metadiamicititos ferruginosos e formações ferríferas associadas em relação aos trabalhos prospectivos pioneiros de Viveiros *et al.* (1978). Empresas, como a Sul Americana de Metais S.A. (SAM), Mineração Minas Bahia (MIBA) e VALE, têm trabalhos exploratórios avançados, sustentados por milhares de furos de sonda que revelam reservas superiores a vinte bilhões de toneladas de minério de ferro de baixo a médio teor (Porto 2013), em uma região de baixíssima densidade demográfica.



- Depósitos aluvionares
- Coberturas detrito-coluvionares em superfícies de aplainamento
- Canga
- Formação São Domingos

Grupo Macaúbas

- Formação Chapada Acauã
- Formação Chapada Acauã - filitos e metassiltitos
- Formação Chapada Acauã - formação ferrífera
- Formação Nova Aurora
- Formação Nova Aurora - Membro Riacho Poções
- Formação Nova Aurora - Membro Riacho Poções - formação ferrífera
- Formação Rio Peixe Bravo
- Formação Rio Peixe Bravo - quartzitos

- Supergrupo Espinhaço
- Complexo Córrego do Cedro
- Complexo Córrego do Cedro - anfíbolito
- Complexo Córrego do Cedro - rocha metaltramáfica
- Rocha metavulcânica, intermediária a ácida
- Granito Catolé
- Sienito Serra Branca
- Suíte Rio Itacambirú

- Contato indiscriminado
- Falha indiscriminada

Figura 5. Mapas geológico e magnetométrico (amplitude do sinal analítico) da área coberta pelas folhas Padre Carvalho, a sul, e Rio Pardo de Minas a norte. As cartas geológicas são de Mourão *et al.* (1996) e Roque *et al.* (1996). Os dados magnetométricos são da Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG, Área 8, 2006).

3.2. Geologia do Distrito Ferrífero Nova Aurora

As grandes unidades estratigráficas da região do Distrito Ferrífero Nova Aurora são as formações Rio Peixe Bravo, Nova Aurora e Chapada Acauã, do Grupo Macaúbas, e as coberturas cenozóicas que ocorrem em chapadas. Entretanto, os grandes depósitos de ferro parecem estar restritos ao Membro Riacho Poções da Formação Nova Aurora, embora existam ocorrências de formação ferrífera diamictítica na Formação Chapada Acauã Inferior (Grossi-Sad *et al.* 1997).

A Formação Nova Aurora é composta por metadiamicititos, com intercalações de quartzitos e metapelitos (filitos e xistos micáceos e granatíferos), incluindo o conjunto dominado por metadiamictito ferruginoso e metadiamictito sulfetado, com intercalações de formação ferrífera diamictítica, quartzito e filito hematíticos do Membro Riacho Poções. Este membro situa-se na porção basal da Formação Nova Aurora, seguido por espesso pacote de metadiamictito não ferruginoso (Vilela 2010). A espessura do Membro Riacho Poções foi estimada em aproximadamente 600m (Viveiros *et al.* 1978; Grossi-Sad *et al.* 1997, Uhlein *et al.* 1999), mas é difícil uma avaliação precisa devido a intensa e complexa deformação regional. Os metadiamicititos da Formação Nova Aurora, incluindo o Membro Riacho Poções, são interpretados como depósitos glácio-marinhos do Criogeniano (Pedrosa-Soares *et al.* 2011b).

Na área do distrito são reconhecidos três acervos de estruturas tectônicas, os quais estão relacionados a três fases de deformação (Uhlein 1991, Mourão *et al.* 1996, Roque *et al.* 1996, Marshak *et al.* 2006, Vilela 2010). A primeira fase (D_1), correspondente à principal deformação dúctil regional, se caracteriza pela foliação principal (S_1) de direção NNE e mergulho entre 15° e 50° para ESE. A foliação S_1 é uma xistosidade paralela ao plano axial de dobras apertadas a isoclinais, geralmente transpostas e rompidas, vergentes para oeste. Uma marcante lineação de estiramento de seixos é paralela à lineação mineral contida em S_1 (Figura 6).

Os indicadores cinemáticos relacionados às estruturas D_1 indicam transporte tectônico para oeste, rumo ao Cráton do São Francisco. A segunda fase de deformação (D_2) se caracteriza pela foliação S_2 que mergulha em torno de 45° para oeste. S_2 se caracteriza como uma xistosidade ou clivagem de crenulação paralela ao plano axial de dobras assimétricas, em cascata, vergentes para leste (Figura 6). Paralelas a S_2 , ocorrem falhas normais tardias com blocos de capa deslocados rumo a leste. As estruturas e transporte tectônico relacionados à fase de deformação D_2 caracterizam uma larga zona de cisalhamento dúctil-rúptil com movimentação normal, a Zona de Cisalhamento Chapada Acauã, que acomodou deslocamentos associados ao colapso gravitacional do Orógeno Araçuaí (Alkmim *et al.* 2006, Marshak *et al.* 2006). A terceira fase deformacional (D_3) representa a

deformação rúptil regional, caracterizada por dois sistemas de fraturas bem espaçadas, direcionados a NW e NE, que se associam às grandes flexuras regionais (Vilela 2010).

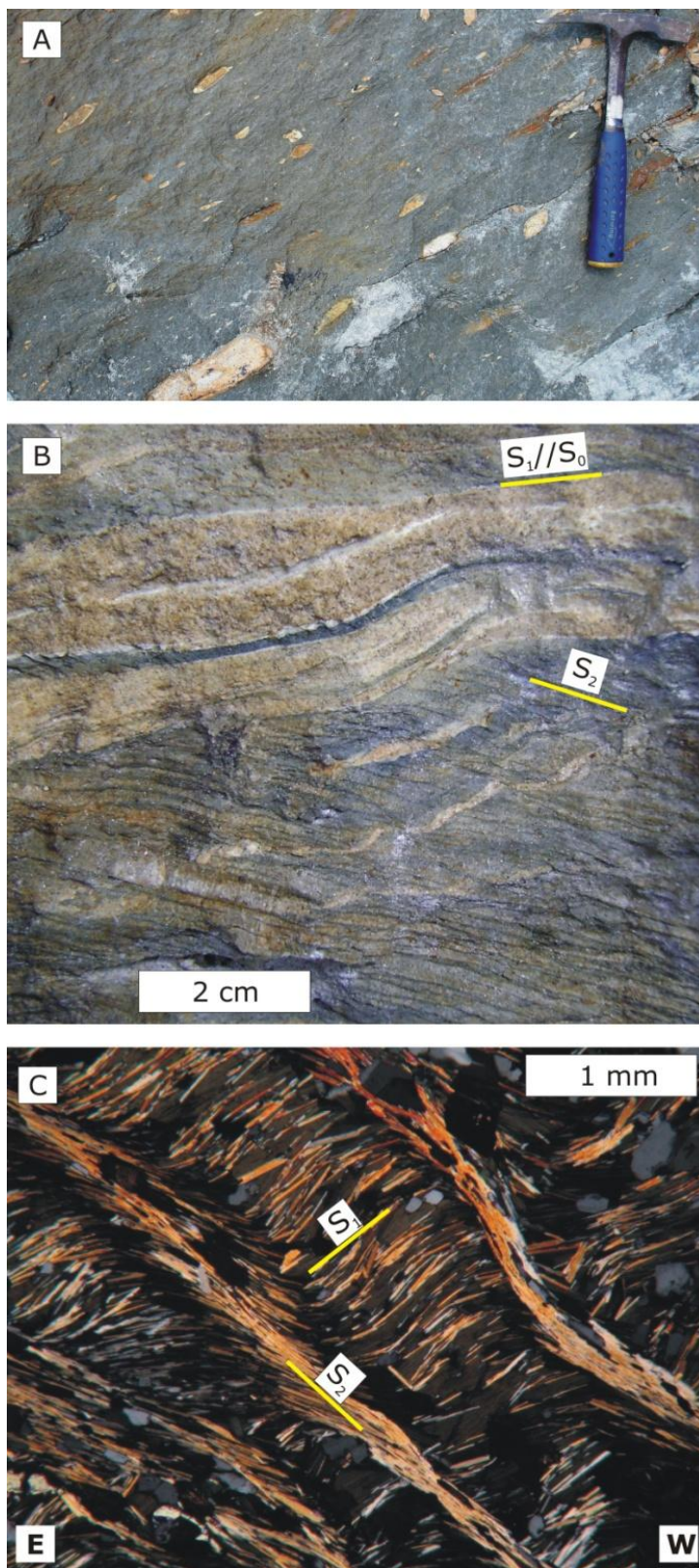


Figura 6. Estruturas de rochas da Formação Nova Aurora (indica-se a direção E-W na foto inferior): A, metadiamicrito hematítico, mostrando estiramento de seixos de carbonato (creme a ocre), quartzito e quartzo leitoso; B, metadiamicrito hematítico com intercalações de quartzito que marcam a estratificação reliquiar, à qual se paraleliza a xistosidade regional S_1 , que, de forma mais nítida na porção cinza (rica em hematita), é cortada pela foliação de crenulação S_2 (observar, logo acima da escala, que lâminas quartzíticas e seixos estão transpostos na direção de S_2); C, fotomicrografia de metapelito, mostrando a relação entre as foliações S_1 e S_2 (nicóis cruzados). Fonte: Vilela *et al.* 2014.

3.3. Depósitos de Ferro da Formação Nova Aurora

Apresenta-se uma síntese dos estudos realizados por Vilela (2010), atualizada com dados coletados posteriormente (Vilela *et al.* 2014, e esta dissertação). As rochas adiante descritas foram amostradas em afloramentos e testemunhos de sondagem, situados em áreas prospectadas pela SAM (Sul Americana de Metais S/A). Estas áreas encontram-se no domínio de grandes chapadas dissecadas por vales íngremes, esculpidos por drenagens que, atualmente, são intermitentes em sua maioria. As áreas têm como substrato a Formação Nova Aurora, incluindo seu Membro Riacho Poções. Nas áreas amostradas, o Membro Riacho Poções é representado por variedades de metadiamicrito ferruginoso (a hematita e/ou magnetita) que podem atingir teores de ferro acima de 15% (em peso), classificando-se como formação ferrífera diamictítica. A rocha regional, encaixante das camadas ferruginosas, é um metadiamicrito com pequena concentração de ferro total (< 5% em peso). Os termos intermediários entre a formação ferrífera diamictítica *s.s.* (> 15% Fe) e o metadiamicrito encaixante (< 5% Fe) são também incluídos no Membro Riacho Poções.

3.3.1. Metadiamicrito Encaixante (ou Regional)

Trata-se de um metarrudito suportado pela matriz que ocorre na base e no topo da sucessão litológica portadora de minério de ferro, parecendo ser bem mais espesso no topo. A abundante matriz do metadiamicrito encaixante é cinza-azulada a bege, localmente esverdeada, e envolve clastos mal selecionados em composição e tamanho. Esta matriz, cuja granulação média varia desde menor que 0,01mm até 0,5mm, é composta por quartzo, muscovita, biotita e/ou clorita, com carbonato e feldspato subordinados. O quartzo está geralmente recristalizado, com formas poligonais a estiradas segundo a lineação contida em S_1 . Os grãos de quartzo menores foram mais afetados pela deformação e recristalização, mas os maiores podem apresentar características sedimentares preservadas, como formas arredondadas. Os filossilicatos (muscovita, biotita e clorita) mostram hábitos fibroso a ripiforme, definem as foliações S_1 e S_2 , e envolvem os demais grãos da matriz e os clastos. O carbonato da matriz apresenta formas poligonais ou está orientado segundo a foliação, parecendo ser predominantemente metamórfico. Poucos grãos de carbonato da matriz têm características que podem ser detríticas, embora clastos de carbonato do tamanho de grânulo a seixo são frequentemente encontrados no metadiamicrito. Dentre os feldspatos, o plagioclásio predomina sobre feldspato potássico, sendo ambos detríticos, com formas arredondadas de bordas sinuosas bem preservadas, embora ligeiramente estiradas. A maioria dos grãos de feldspato está significativamente fraturada e alterada por processos como saussuritização e sericitização.

Os principais minerais acessórios da matriz do metadiamicrito regional são epidoto, apatita e turmalina, mas também ocorre zircão, rutilo e minerais opacos (óxidos de ferro, sulfetos). O epidoto, metamórfico, está estirado e envolto por muscovita fibrosa. A apatita é predominantemente

detrítica, pois se apresenta em grãos arredondados e fraturados. Apatita metamórfica é rara, tem hábito prismático com seção basal euédrica e está orientada segundo a foliação. A turmalina detrítica caracteriza-se por formas arredondadas, mas sua geração metamórfica, que ocorre na porção mais fina da matriz, apresenta seção basal trigonal e hábito prismático.

Quando prevalece clorita e biotita, em relação à muscovita, o metadiamicitito torna-se esverdeado e contém sulfetos (pirita, pirrotita e rara calcopirita) disseminados na matriz e estirados segundo a foliação. Ocorrem porfiroblastos de granada que ultrapassam 1 mm de diâmetro. O metadiamicitito esverdeado apresenta menor quantidade de clastos.

O metadiamicitito regional contém quantidades muito variadas de clastos de carbonato, quartzo, quartzito, metapelito (filito e xisto), gnaisse e granitóide, os quais variam de tamanho entre grânulo e matacão, predominando os seixos. Os clastos de carbonato, quartzo, quartzito e metapelito estão geralmente estirados paralelamente à direção do mergulho da foliação S_1 , materializando a marcante lineação de estiramento regional que também se manifesta nos metadiamicititos ferruginosos (Figura 6). Nas raras zonas de menor deformação, os clastos estão preservados e apresentam formas angulares a arredondadas, sem orientação.

3.3.2. *Litotipos do Membro Riacho Poções*

Esta subunidade da Formação Nova Aurora é caracterizada pela grande abundância de metadiamicitito ferruginoso, ocorrendo amplo espectro de variações composicionais entre os termos hematíticos e magnetíticos (Vilela 2010). O contato basal do Membro Riacho Poções se caracteriza por zona de cisalhamento dúctil onde ocorrem recristalização e reconcentração de especularita e/ou magnetita. Nesta zona de contato basal, a quantidade de especularita pode alcançar até 60% (em volume) da matriz do metadiamicitito hematítico e aparecem porfiroblastos de magnetita de granulação grossa (> 1mm), geralmente deformados e rotacionados. Da base ao topo, a partir do contato rico em especularita e/ou magnetita, o Membro Riacho Poções caracteriza-se pela predominância de metadiamicitito hematítico com teor de ferro variável, mas decrescente rumo ao topo.

A quantidade de hematita da matriz do metadiamicitito hematítico varia entre 5% e 60%. Hematita e micas ocorrem em concentrações inversamente proporcionais, observando-se em campo a clara diminuição na concentração de hematita rumo ao topo mais enriquecido em mica. O metadiamicitito hematítico possui trama similar à do metadiamicitito encaixante, mas contém quantidades significativas de hematita em detrimento das micas e outros minerais. A hematita ocorre disseminada na matriz do metadiamicitito, e se concentra em lâminas, bandas e lentes correspondentes às foliações S_1 e S_2 , mostrando características diferentes em cada caso (Figuras 6 e 7). A hematita é relativamente fina na matriz de lentes e camadas que corresponderiam à

estratificação original, mas apresenta granulação maior nas lâminas e bandas resultantes das fases de deformação e metamorfismo que originaram as foliações S_1 e S_2 . A concentração de hematita em S_2 pode formar um marcante bandeamento metamórfico, discordante de S_1 , que é destacado pela alternância de lâminas ricas em specularita com lâminas compostas de quartzo, muscovita e hematita. A hematita specular fina raramente excede 0,1mm de comprimento e ocorre na matriz do metadiamicrito. Esta hematita specular fina materializa, juntamente com as micas, a foliação S_1 da matriz, na qual forma arranjos anastomosados, envolvendo grãos de quartzo, feldspato e carbonato (Figura 7A, B). A hematita specular grossa alcança 1mm de comprimento e se concentra em lâminas correspondentes às foliações S_1 e S_2 (Figura 7C, D). Quartzo, carbonato e micas ocorrem estirados paralelamente às lâminas ricas em specularita. Hematita granular também ocorre na matriz do metadiamicrito, mas em quantidades muito inferiores às demais variedades.

Magnetita, parcial a totalmente martitizada, geralmente não passa de 2% em relação ao volume de matriz do metadiamicrito hematítico (à exceção de zonas de cisalhamento onde ocorre enriquecimento em magnetita). A magnetita pode atingir 2cm de diâmetro e ocorre disseminada na matriz ou associada à lâminas e bandas ricas em hematita specular grossa. Os cristais de magnetita podem se mostrar estirados, rotacionados e subgranulados, apresentando caudas de recristalização ricas em hematita specular grossa e sombras de pressão com quartzo e/ou carbonato (Figura 7E). Porfiroblastos de magnetita, euédricos a subédricos, ocorrem disseminados na matriz (Figura 7F). Quando martitizada, a magnetita mostra muitas inclusões de quartzo e outros minerais.

O metadiamicrito magnetítico apresenta tonalidade cinza mais escura que o metadiamicrito hematítico e se caracteriza pelo aumento progressivo na quantidade de magnetita em relação à de hematita (que pode estar ausente deste tipo de minério). A magnetita é geralmente porfiroblástica e pode atingir 2mm de diâmetro, predominando granulação maior que 0,7mm. Apesar da deformação da matriz, a magnetita geralmente se apresenta pouco ou nada deformada. Quando deformada, a magnetita orienta-se paralelamente à foliação S_1 que é materializada por quartzo estirado, mica e hematita fina (Figura 8A, B). Porfiroblastos euédricos a subédricos de magnetita com até 1mm de diâmetro, assim como magnetita fina, ocorrem disseminados na matriz (Figura 8C, a F).

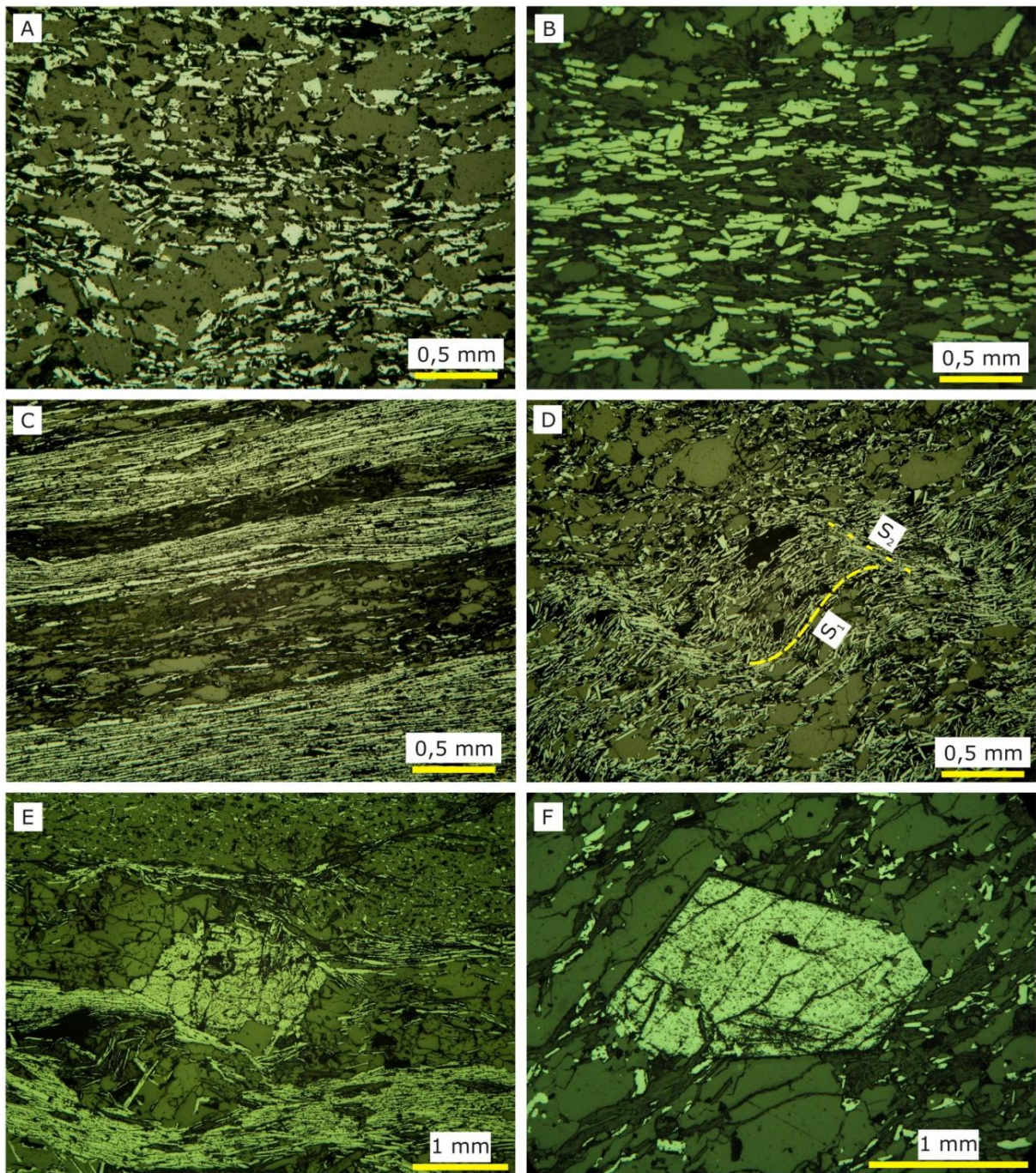


Figura 7. Fotomicrografias do metadiamictito hematítico em luz refletida: A, hematita especular fina ao longo da foliação S_1 , anastomosada, envolvendo outros componentes da matriz (predominantemente quartzo recrystalizado e rara hematita granular); B, concentração de hematita especular fina em lâminas S_1 (neste caso, a menor quantidade e menor tamanho dos minerais da ganga permitem uma orientação mais uniforme da especularita); C, concentração e recrystalização de especularita grossa em lâminas S_2 , intercaladas com lâminas pobres em hematita; D, transposição de S_1 por S_2 , mostrando recrystalização de hematita especular grossa em S_2 ; E, porfiroblasto de magnetita martitizada, estirado e subgranulado, com cauda de recrystalização de especularita; F, porfiroblasto idiomórfico de magnetita martitizada, isolado na matriz do metadiamictito hematítico. Fonte: Vilela *et al.* 2014.

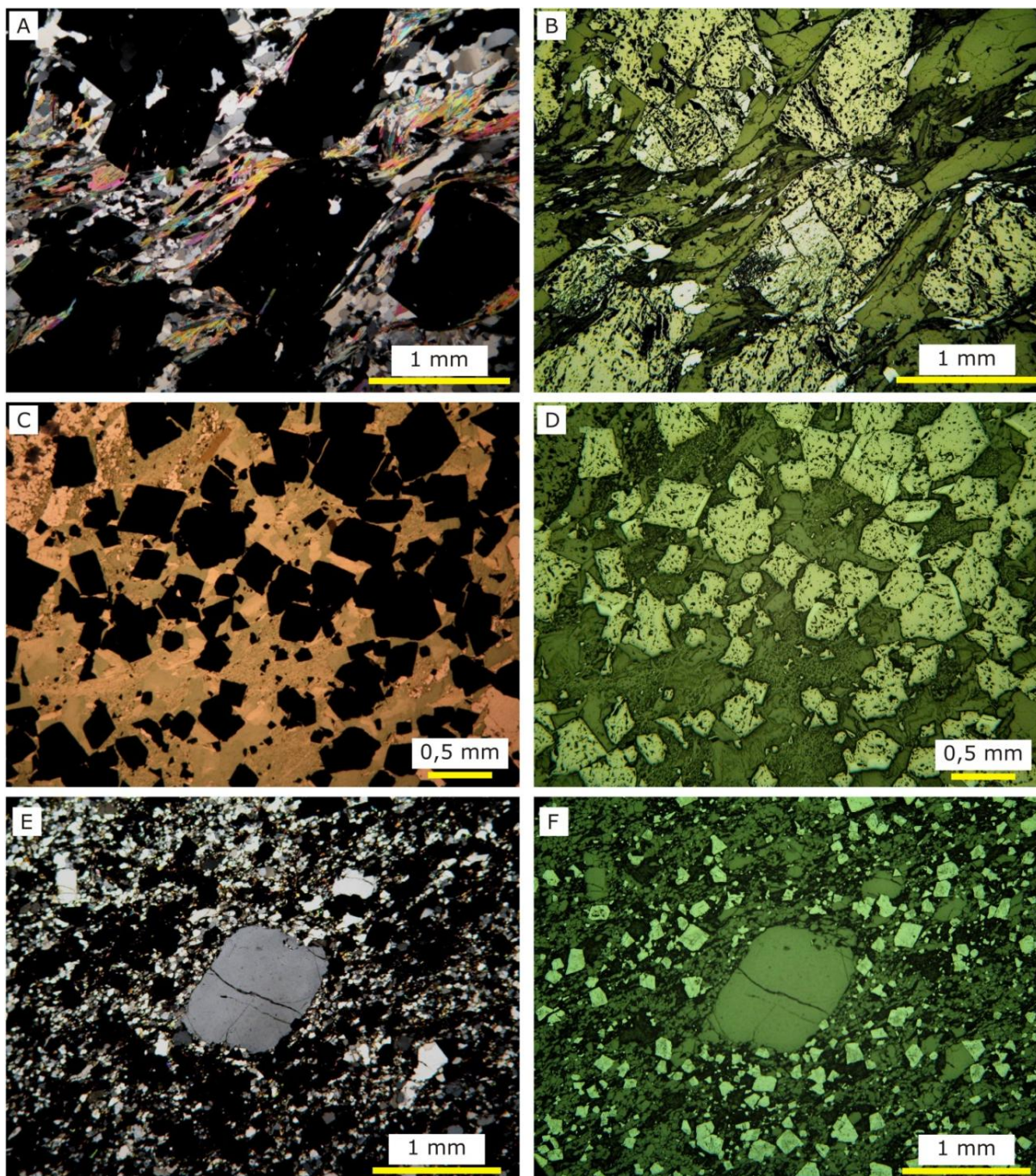


Figura 8. Fotomicrografias do metadiamictito magnetítico: A (luz transmitida, nicóis paralelos), B (luz refletida); tomadas do mesmo local, mostrando porfiroblastos deformados de magnetita grossa (> 1mm), parcialmente martitizados, envolvidos por quartzo e muscovita que marcam a xistosidade S₁; C (luz transmitida, nicóis paralelos), D (luz refletida); tomadas do mesmo local, mostrando porfiroblastos euédricos a subédricos de magnetita em matriz rica em clorita (esverdeada); E (luz transmitida, nicóis paralelos), F (luz refletida); tomadas do mesmo local, magnetita euédrica a subédrica, de granulação fina a média (< 0,3 mm), disseminada em matriz rica em quartzo. Fonte: Vilela *et al.* 2014.

O metadiamictito magnetítico pode ser bandado, com bandas de cor cinza, ricas em magnetita, intercaladas com bandas mais ricas em quartzo e muscovita. A quantidade de hematita especular aumenta nas bandas ricas em magnetita. Quando mostra tons esverdeados, o metadiamictito magnetítico apresenta aumento na concentração de clorita e biotita (Figura 8C,D). Poiquiloblastos de granada ocorrem nas bandas clorítico-biotíticas mais espessas e com menos magnetita. A quantidade de sulfetos (predominantemente pirita) parece aumentar na passagem do metadiamictito magnetítico para o metadiamictito regional que, também, se apresenta sulfetado.

Semelhantemente à magnetita, os sulfetos podem estar presentes na forma de porfiroblastos subédricos a euédricos (geralmente cúbicos), com granulação inferior a 1mm, ou estirados e concentrados ao longo da xistosidade S_1 .

4. MATERIAL E MÉTODOS

Ferramentas em ambiente SIG (Sistemas de Informações Geográficas) foram utilizadas para processar, integrar e interpretar informações geológicas, geofísicas (gamaespectrometria e magnetometria), modelo digital de terreno e de sensoriamento remoto orbital.

Todos os dados tiveram os parâmetros cartográficos uniformizados, tendo sido utilizada a Projeção Universal Transversa de Mercator, Fuso 23S e datum horizontal WGS84.

O processamento foi feito com o objetivo de realçar os contrastes existentes entre os litotipos, separando os corpos ricos em ferro aflorantes e não aflorantes.

4.1. Mapas geológicos

Os mapas geológicos utilizados foram as folhas Padre Carvalho (Mourão *et al.* 1996) e Rio Pardo de Minas (Roque *et al.* 1996) do Projeto Espinhaço (Figura 9), produzidos originalmente em escala 1:100.000 e já transformados em formato SIG (ArcGIS[®]) pelo MGD (Laboratório de Mapeamento Geológico Digital) - CPMTCC (Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa - UFMG).

Além destes, foram utilizados os mapas geológicos de Vilela (2010 escala original 1:10.000) e da Sul Americana de Metais S.A. (SAM 2013 escala original 1:15.000), no estudo de caso apresentado.

4.2. Levantamento aerogeofísico: magnetometria e gamaespectrometria

Os dados de aerogeofísica utilizados são aqueles da Área 8 (Minas Novas-Riacho dos Machados-Espinosa) do Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (CODEMIG-SEDE-CPRM 2006) (Figura 10). O levantamento aerogeofísico constou do recobrimento de 87.212,45km de perfis aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos de alta resolução, com linhas de voo e controle espaçadas de 0,5km e 10,0km e orientadas nas direções N25W e N65E, respectivamente. O intervalo entre medições geofísicas consecutivas foi de 0,1s (magnetômetro) e 1,0s (espectrômetro). A altura média de voo foi de 100m e a velocidade aproximada de 280km/h (CODEMIG-SEDE-CPRM 2006).

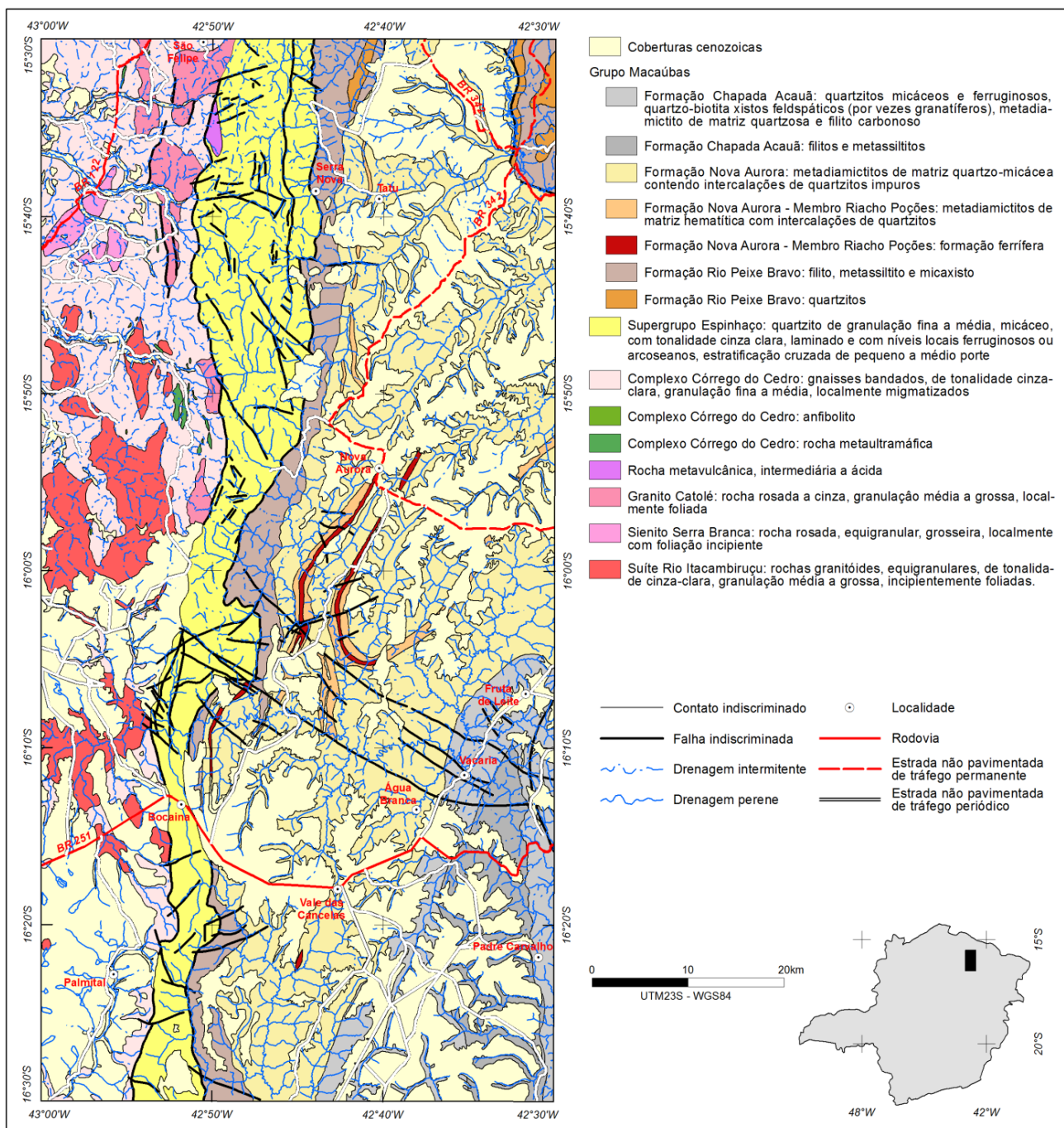


Figura 9. Mapa geológico das folhas Padre Carvalho e Rio Pardo de Minas, do Projeto Espinhaço (Modificado de Mourão et al. 1996 e Roque et al. 1996).

Os dados brutos, gravados em formato binário na aeronave foram convertidos diretamente para bancos de dados no formato de GDB's compatíveis com o OASIS MONTAJ, onde estão agrupadas informações de posicionamento corrigidas e todos os demais canais de informação registrados a bordo da aeronave.

Preparado o banco de dados do tipo XYZ, onde Z corresponde a uma das variáveis medidas a bordo da aeronave e XY as coordenadas UTM do ponto em que a medida foi tomada, o processamento foi então iniciado com a correção dos dados magnetométricos e radiométricos, como descritos em CODEMIG-SEDE-CPRM (2006).

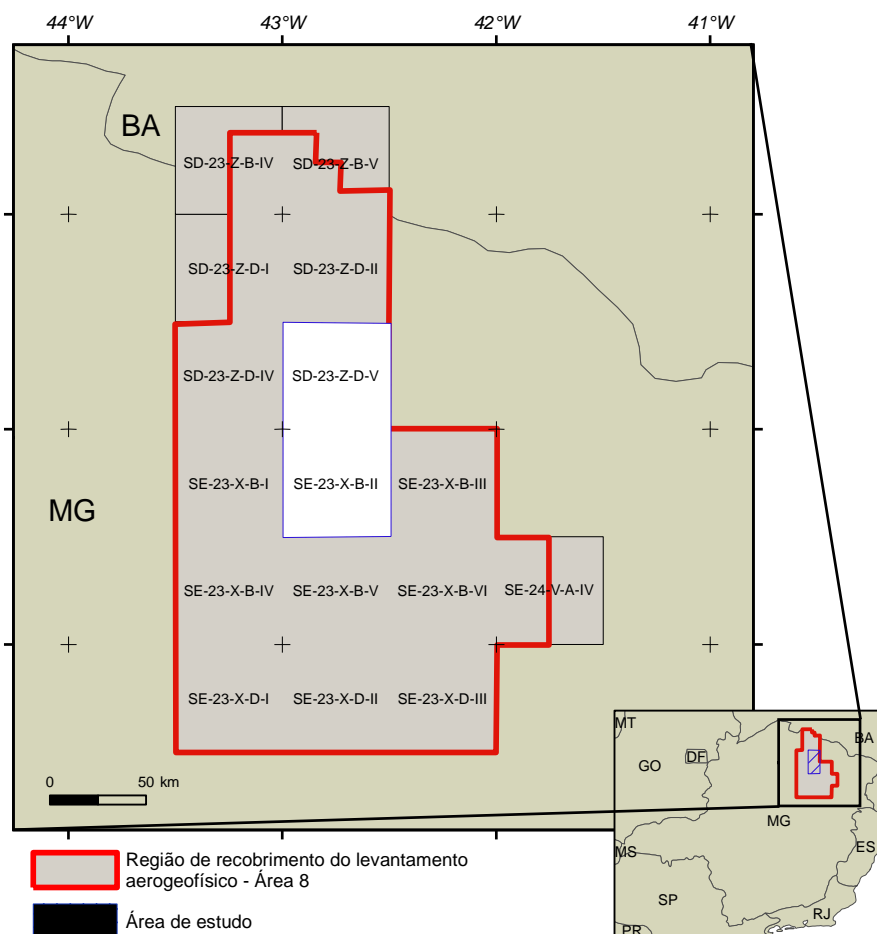


Figura 10. Área de recobrimento do levantamento aerogeofísico da Área 8 – Minas Novas-Riacho dos Machados-Espinosa (CODEMIG-SEDE-CPRM 2006), mostrando a área de interesse dessa dissertação.

A CODEMIG aplicou aos dados magnetométricos as correções de erro de paralaxe, remoção da variação magnética diurna, nivelamento dos perfis, micronivelamento dos perfis e remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF), como descritos em CODEMIG-SEDE-CPRM (2006).

Aos dados gamaespectrométricos CODEMIG aplicou a correção de tempo morto, aplicação de filtragem, o cálculo da altura efetiva de vôo, remoção do *background* da aeronave e cósmico, remoção do *background* do radônio, estimativa dos coeficientes *skyshine*, correção do efeito *compton* e correção altimétrica. A correção do erro de paralaxe não foi aplicada, já que não foi observado o erro nos dados radiométricos como descritos em CODEMIG-SEDE-CPRM (2006).

4.2.1. Processamento dos dados geofísicos magnetométricos

Os dados magnetométricos são resultantes da medição de variações na intensidade do campo magnético da Terra, causadas pela distribuição irregular das rochas magnetizadas em subsuperfície.

Cada rocha se magnetiza de forma diferente, dependendo do modo de distribuição dos minerais magnéticos presentes, o que influencia sua susceptibilidade magnética. O campo magnético da Terra sofre distorções locais, de acordo com a concentração de minerais magnéticos.

Estas distorções podem ser detectadas e medidas, fornecendo informações sobre a subsuperfície. Os principais minerais magnéticos são magnetita, maghemita, pirrotita e ferro nativo ou ligas de Fe – Ni – Co. Estes minerais nos fornecem anomalias magnéticas devido às suas susceptibilidades magnéticas elevadas ou devido à sua alta magnetização remanescente. Cerca de 99% das anomalias magnéticas são causadas pela magnetita, que é um mineral acessório presente na maioria das rochas, mas raramente ultrapassando 1% do total do seu volume.

O campo magnético da Terra provoca um campo secundário induzido nas rochas que contêm minerais magnéticos. A intensidade desse campo secundário é proporcional à intensidade do campo geomagnético sendo a constante de proporcionalidade definida como susceptibilidade magnética.

É possível avaliar as condições geológicas locais através de contrastes do valor do campo magnético local. Esses contrastes podem ser causados devido a diferenças litológicas, presença de materiais não naturais e outras heterogeneidades existentes no subsolo.

Uma sequência de processamentos foi executada para se gerar os dados aerogeofísicos derivados dos dados originais (Figura 11). Foram efetuados testes de consistência para se garantir a qualidade dos dados.

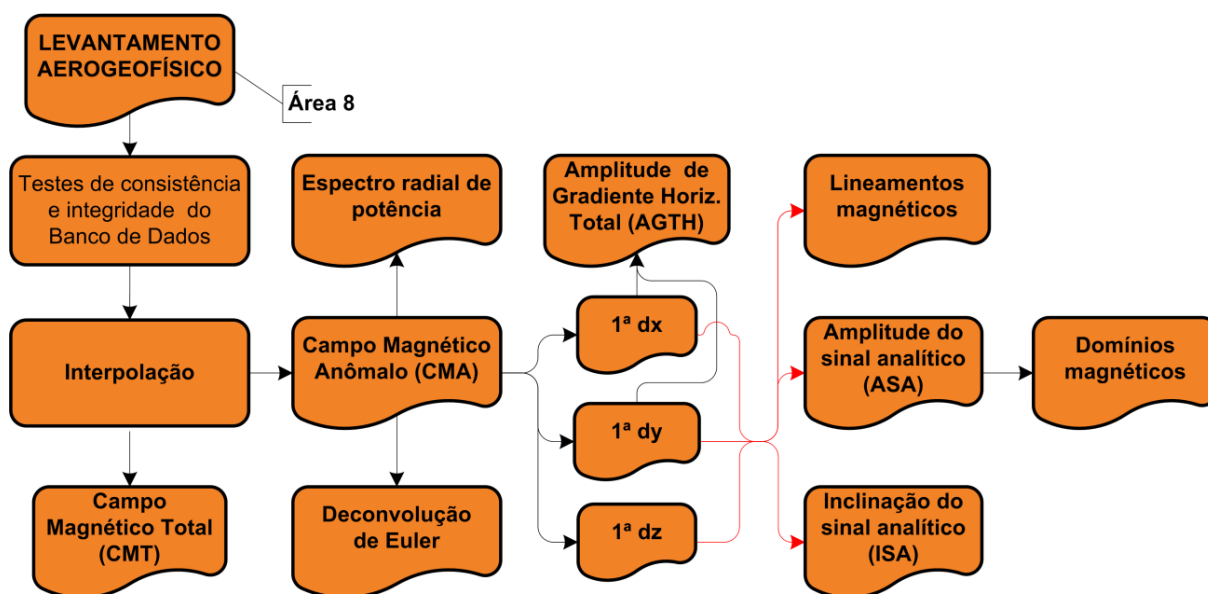


Figura 11. Fluxograma de processamento dos dados magnetométricos

4.2.1.1. Testes de consistência

Utilizando os dados micronivelados, foram efetuados testes de consistência para se localizar e eliminar problemas relativos a posicionamento de linhas de voo (cruzamento de linhas) ou a ruídos (*spikes*) gerados na aquisição dos dados. Depois desta etapa inicial, foram calculadas a diferença quarta e parâmetro P (Blum 1999).

O método da diferença quarta consiste em derivar os dados por quatro vezes sucessivas, eliminando as informações sobre as baixas frequências, sendo que o dado resultante contém as informações de frequência mais alta, que está relacionada geralmente a ruídos nos dados.

Calcula-se o Parâmetro P para restringir o número de anomalias e tentar encontrar somente os “picos”. Assumindo que a distribuição dos dados coletados seja normal, 99,7% dos dados estão em torno da média e têm seus valores entre -3 e 3 vezes o desvio padrão. Sabendo-se que o logaritmo de um número negativo não é real, pode-se calcular.

$$P = \log(|x - \bar{x}| - |3 * \sigma|)$$

P= ‘pico’; x = dado em questão; \bar{x} = média; σ = desvio padrão.

Após esta fase, que mostrou que os dados estavam consistentes e com boa qualidade, começou a segunda fase, de geração de subprodutos dos dados do levantamento (Figura 11). Para a interpolação dos dados foi definida a resolução espacial de 125m, que corresponde a 1/4 da distância entre as linhas de voo, que é de 500m.

4.2.1.2. Campo magnético anômalo (CMA)

Utilizando os valores de Campo Magnético Total Micronivelado Reduzido do IGRF, foi gerada a imagem representando o campo magnético anômalo (Figura 12). A imagem apresenta as anomalias magnéticas sempre como duas respostas, sendo um alto e um baixo. Esse caráter dipolar dificulta a sua interpretação, mas mesmo assim auxilia na interpretação da estruturação geral da área em estudo (Sordi 2007).

4.2.1.3. Espectro radial de potência

O espectro radial de potência, calculado a partir do campo magnético anômalo, mostra a média da energia proveniente de todas as direções correspondentes a um número de onda. A análise do espectro radial é um recurso qualitativo para determinar a profundidade das fontes magnetométricas interpretada pelo domínio da frequência. Essa metodologia não é recomendada para estimar a profundidade de forma quantitativa, pois a profundidade é determinada pela média estimada em relação a um comprimento de onda (Gunn 1997).

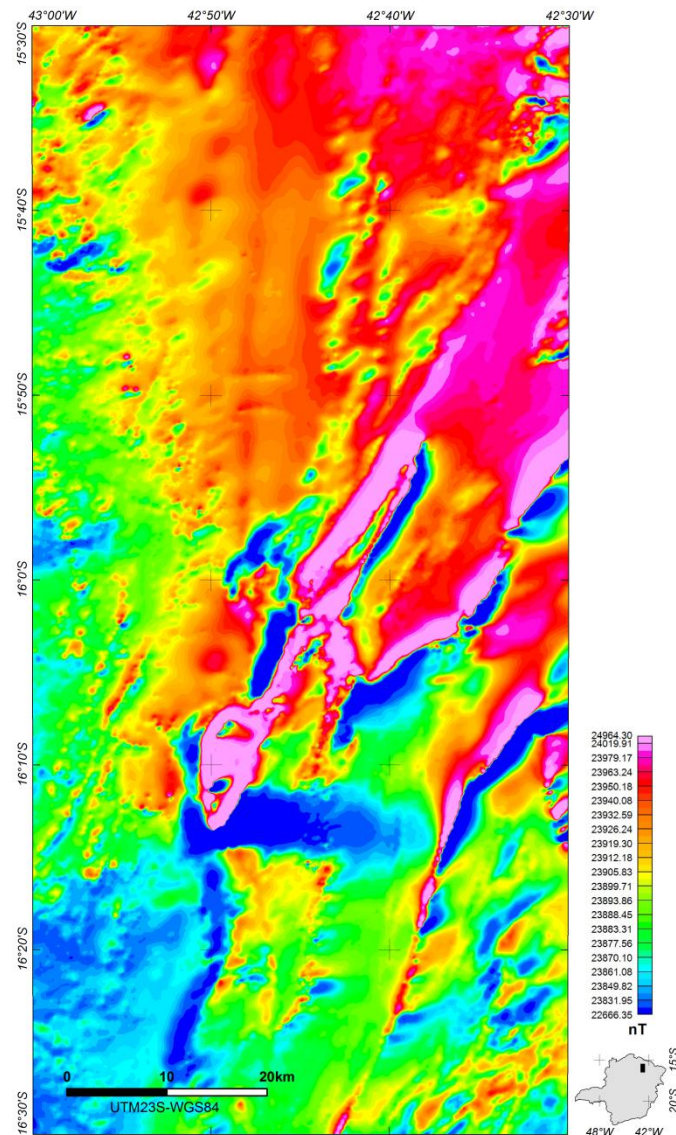


Figura 12. Mapa do campo magnético anômalo (CMA) da área estudada.

Na Figura 13 é apresentado o gráfico do espectro radial da área de levantamento, onde a profundidade dos topos das fontes magnéticas é estimada pela quebra na declividade da curva do espectro de potência. A mudança de gradiente também corresponde à mudança de comprimento de onda, o que pode caracterizar, conseqüentemente, funções geológicas distintas, pois representam fontes magnéticas distintas (Buffon & Strieder 2005).

A observação de diferentes gradientes determinou quatro grupos de fontes magnéticas distintas (Figura 13):

- profundidades muito rasas, de até aproximadamente 0,5km, com comprimento de onda entre 0,5 e 0,85km,
- fontes rasas, entre 0,5 e 0,8km com comprimento de onda entre 0,8 e 2,2km,
- fontes intermediárias, com profundidade entre 0,8 e 1,3km, com comprimentos de onda entre 2,2 e 15km.

- fontes profundas, acima de 1,3km, e comprimento de onda superior a 15km.

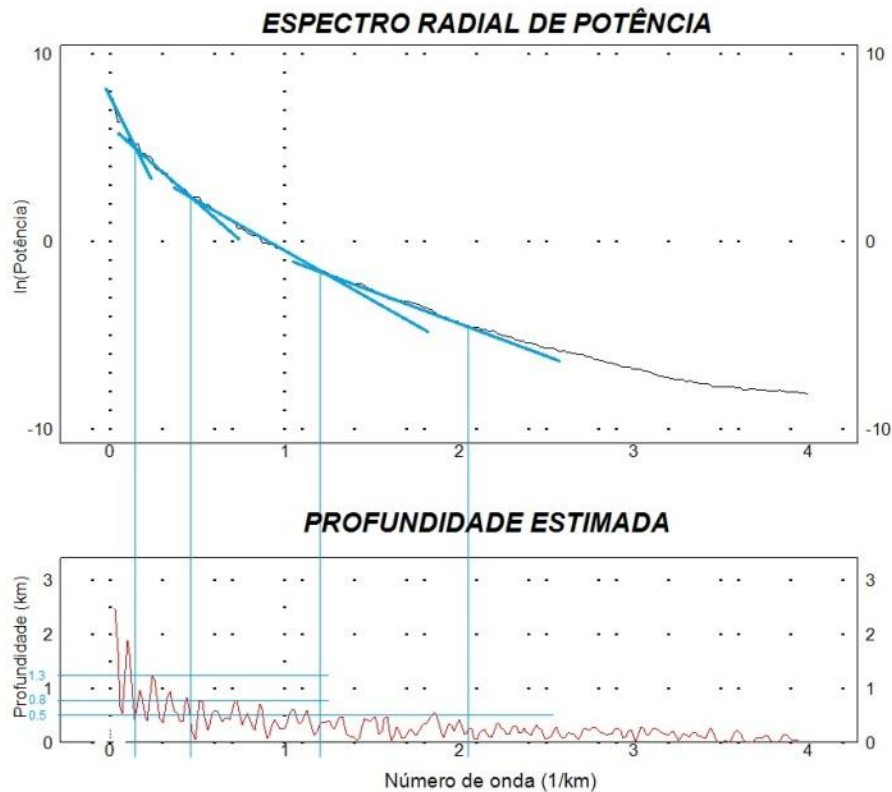


Figura 13. Espectro radial de potência identificando quatro grupos de fontes magnéticas.

4.2.1.4. Derivadas horizontais e vertical

As derivadas horizontais e vertical medem a taxa de variação do campo magnético anômalo em relação à distância da fonte (Maas *et al.* 2003). Essa técnica realça as altas frequências e seus produtos são utilizados para delimitar e localizar melhor o centro dos corpos após a redução ao polo, além dos limites e estruturas causadoras das anomalias (Figura 14). O realce das altas frequências pode fornecer informações sobre os contatos, descontinuidades e lineamentos (Sordi 2007).

4.2.1.5. Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT)

A Amplitude do Gradiente Horizontal Total mostra mudanças laterais abruptas, indicando mudanças litológicas e estruturais (Figura 15a). Localizam os picos de anomalias nos limites dos grandes corpos magnéticos e o realce das altas frequências tende a tornar estes limites mais nítidos (Sordi 2007).

É calculada a partir da expressão:

$$AGHT = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

Onde AGTH = Amplitude de Gradiente Horizontal Total; dx = derivada em x; dy = derivada em y.

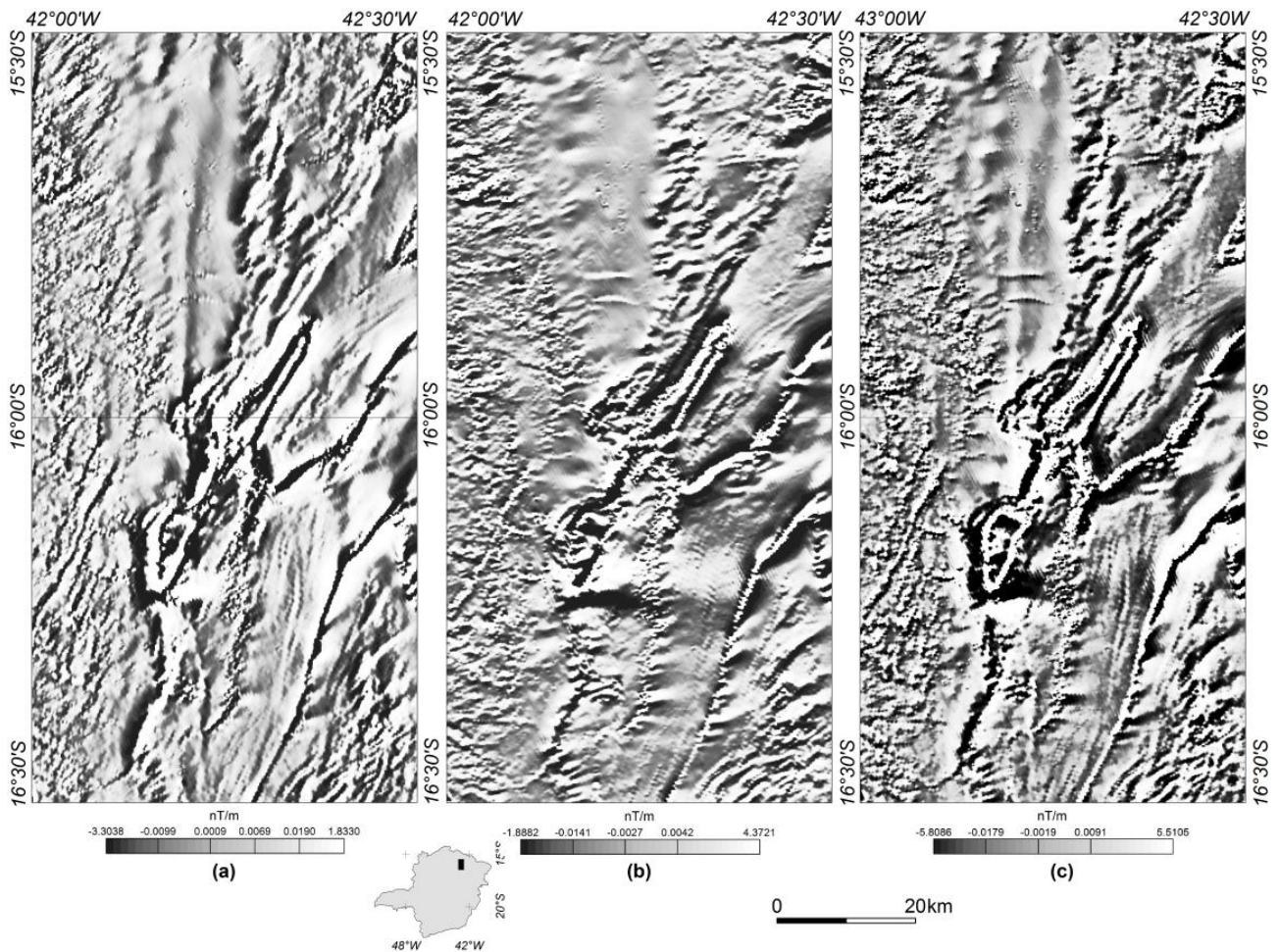


Figura 14. Derivadas horizontais em relação aos eixos x (a) e y (b) e derivada vertical (c) para a região de estudo.

4.2.1.6. Inclinação do sinal analítico (ISA)

É uma estimativa do mergulho da fonte e, portanto o contraste localizado de diferentes susceptibilidades magnéticas (Blum 1999). Estas imagens facilitam a interpretação de feições lineares do relevo.

É definida pelo ângulo formado entre os vetores imaginários da primeira derivada em z, pelos vetores reais da 1ª derivada em x e y. Essa expressão permite realizar a estimativa do mergulho e do contraste de susceptibilidade das fontes causadoras de anomalias. (Buffon & Strieder 2005). A inclinação do sinal analítico é dada por:

$$ISA = \arctan \left(\frac{dz^2}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \right)$$

Onde ISA = inclinação do sinal analítico; dx, dy e dz são as derivadas nas respectivas direções.

A Inclinação do Sinal Analítico é útil para mapear estruturas rasas e alvos para exploração (Sordi 2007, (Figura 15b).

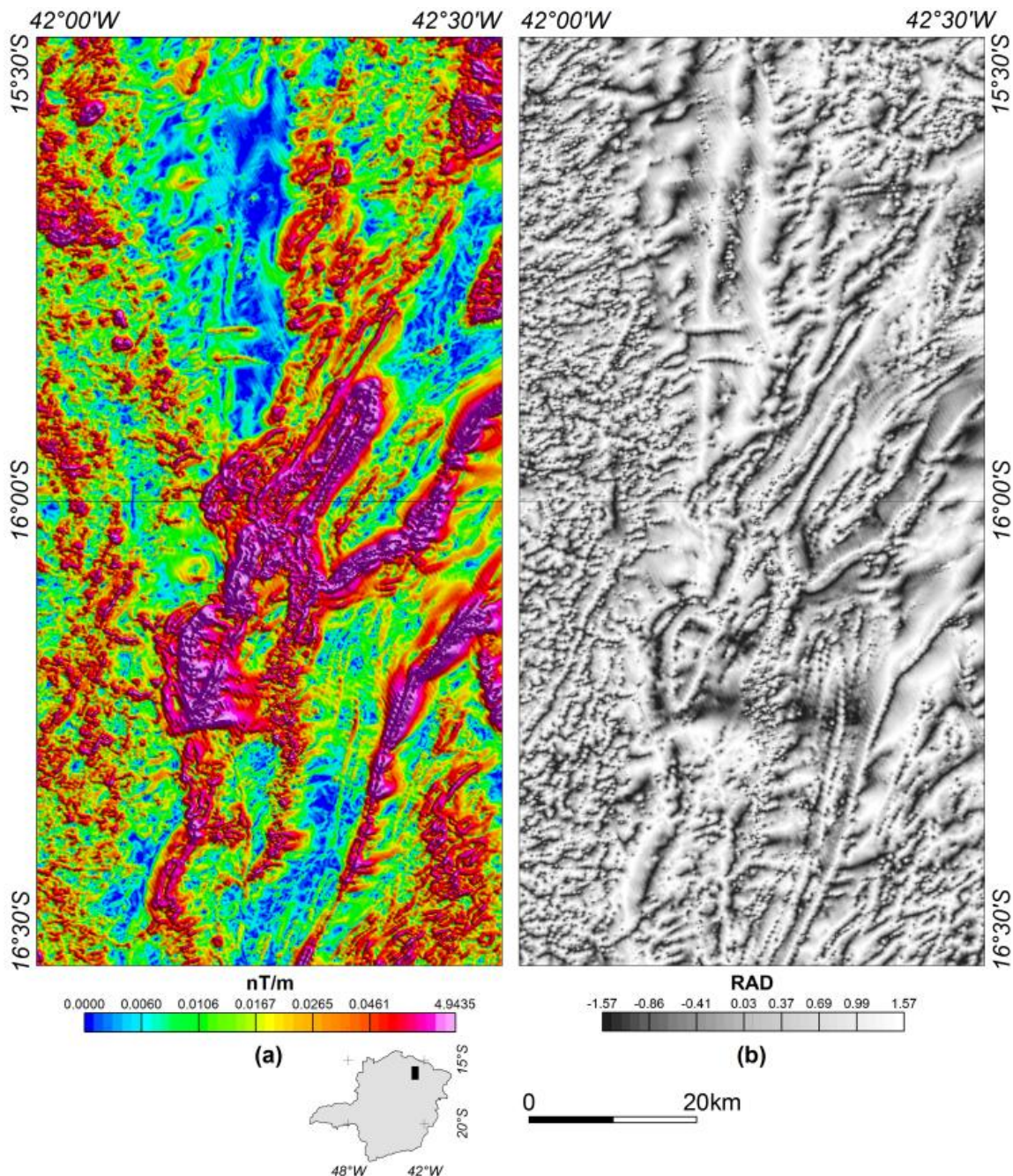


Figura 15. Amplitude do gradiente horizontal total (a) e inclinação do sinal analítico (b) sobre a área de estudo.

4.2.1.7. Amplitude do sinal analítico (ASA)

A amplitude do sinal analítico é calculada a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas do campo magnético anômalo (Figura 16). Apresenta assinatura localizada das fontes magnéticas e, portanto, realça as bordas em corpos largos e o centro em corpos estreitos, independentemente das direções magnéticas da fonte ou do campo magnético da Terra (Blum 1999).

É calculada a partir da expressão:

$$ASA = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$$

Onde: ASA = Amplitude do sinal analítico; dx = derivada em x; dy = derivada em y; dz = derivada em z

4.2.1.8. Domínios magnéticos

Os domínios magnéticos foram delimitados sobre a imagem de amplitude de sinal analítico. Foram identificados sete domínios, denominados D1, D2, D3, D4, D5, D6 e D7 (Figura 16). Os domínios foram delimitados levando-se em conta a intensidade do sinal e a textura da imagem, sendo o domínio D1 o que mostra sinal mais forte e textura mais rugosa e o domínio D7 o que mostra menor intensidade de sinal e textura mais uniforme. A Figura 17 mostra a imagem da amplitude de sinal analítico simbolizada em 2,5 dimensões, utilizando a intensidade de sinal como valor de cota, associada aos limites dos domínios magnéticos identificados.

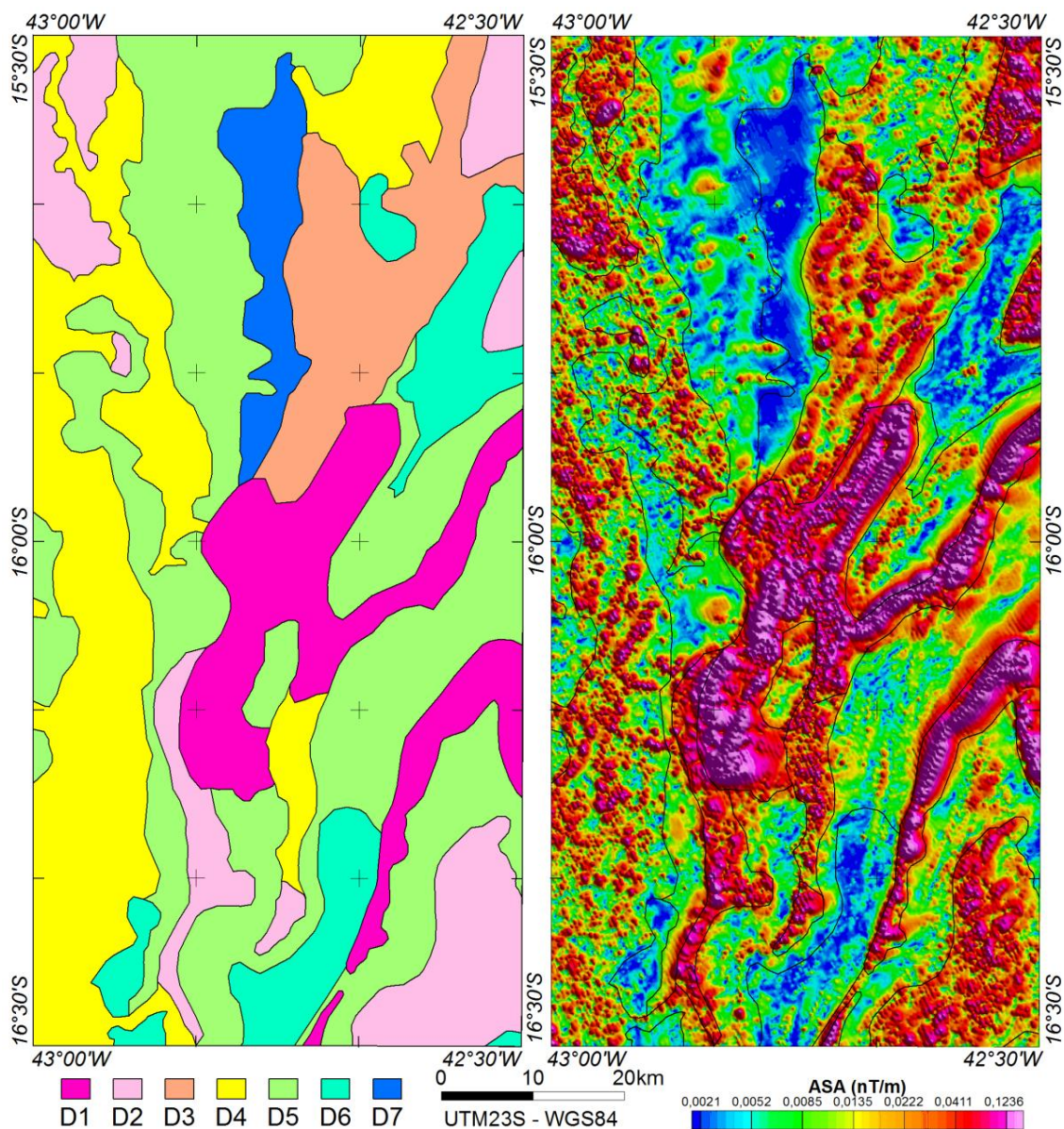


Figura 16. Domínios magnéticos interpretados sobre a área de estudo (domínios magnéticos, à esquerda, e domínios magnéticos sobre a imagem de amplitude do sinal analítico, à direita)

A correlação destes domínios com as rochas do mapa geológico da área (Figura 9) é muito dificultada pela presença de extensas coberturas sedimentares que mascaram as rochas subjacentes. O Domínio 1, onde o sinal é mais forte, corresponde à região onde ocorre a maioria das pesquisas em minério de ferro da região.

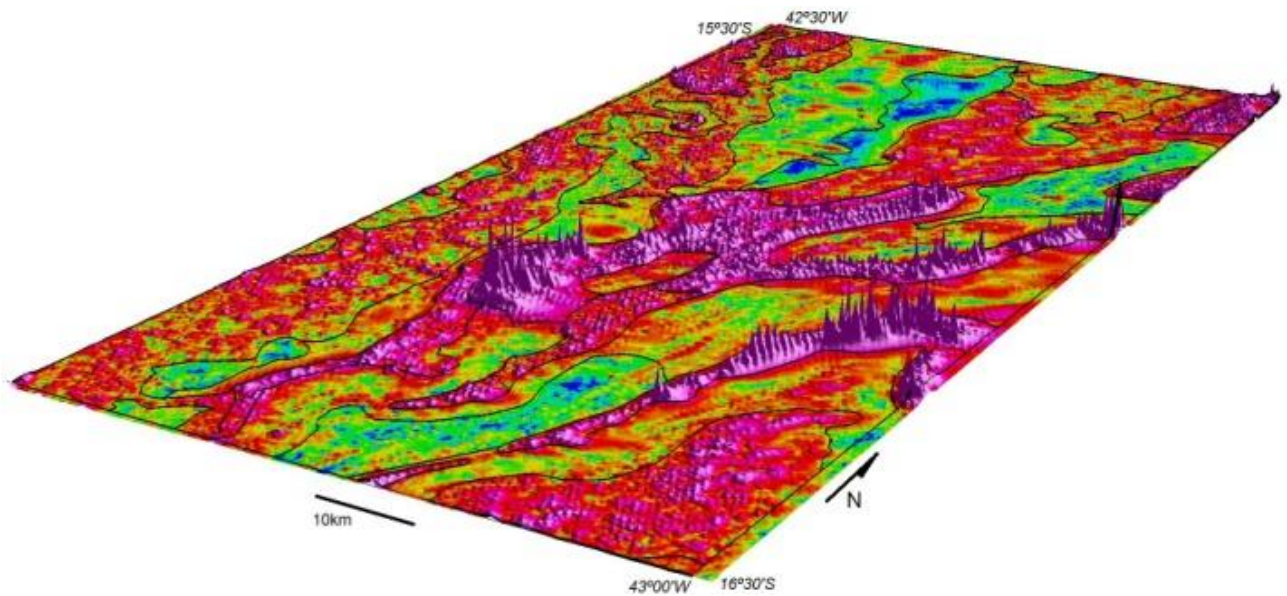


Figura 17. Amplitude do sinal analítico simbolizada em 2,5 dimensões, utilizando a intensidade de sinal como valor da variável z, associada aos limites dos domínios magnéticos identificados.

4.2.1.9. Lineamentos magnéticos

Sobre as imagens criadas a partir do c(Figura 18). Como citado no item 4.2.1.4., esta interpretação pode auxiliar na localização do centro dos corpos após a redução ao polo, além dos limites e estruturas causadoras das anomalias. Além disso, pode fornecer informações sobre os contatos, descontinuidades e lineamentos (Sordi 2007).

Observa-se como feição mais destacada na região nestas imagens a predominância dos lineamentos NE em contraste com as outras direções encontradas.

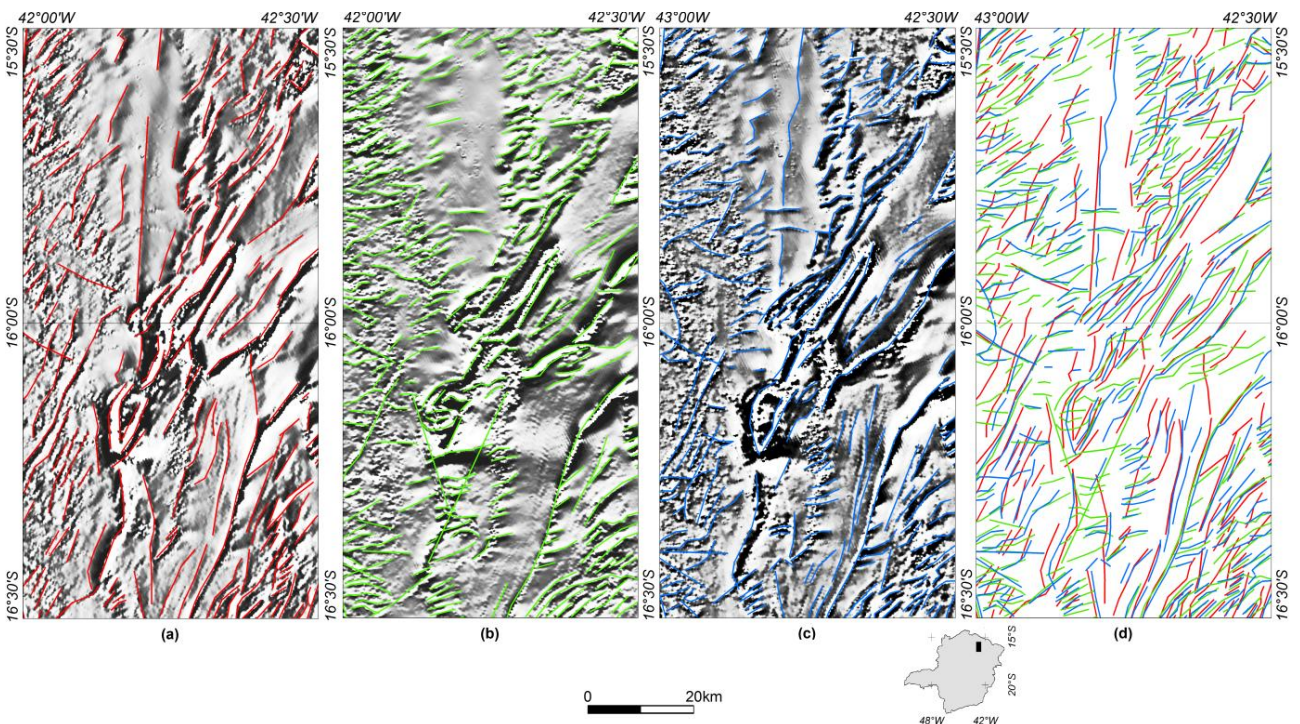


Figura 18. Lineamentos magnéticos na área de estudo, interpretados sobre a derivada em x (a) em y (b), em z (c) e mostrando as interpretações sobre as três direções (d), em vermelho sobre dx, em verde sobre dy e em azul sobre dz.

4.2.1.10. Deconvolução de Euler

O algoritmo de deconvolução de Euler 3D (Thompson 1982), foi desenvolvido com intuito de estimar as profundidades de fontes magnéticas ou de corpos magnéticos

Este processo relaciona o campo magnético à localização da fonte da anomalia, com o grau de homogeneidade N expresso como "índice estrutural". O índice estrutural é a medida da razão da queda do valor do campo magnético em relação à distância da sua fonte (Geosoft 2010).

A profundidade aparente do campo magnético é derivada da equação de homogeneidade de Euler:

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = N(B - T)$$

Onde (x, y, z) = localização do ponto onde é medido o campo total T sobre o plano de observação; (x_0, y_0, z_0) = localização da fonte pontual relativa ao plano de observação; N = índice estrutural; B = campo magnético regional.

O plano de observação é dado por $z = 0$, positivo para baixo. Por convenção, eixo x está na direção norte e y na direção leste. O índice estrutural N está relacionado à geometria da fonte causadora da anomalia e interfere diretamente no decaimento do campo magnético relativo ao plano medido de acordo com o modelo assumido para a fonte magnética (corpos cilíndricos, esféricos, diques finos, etc.). Uma maneira simplificada de se determinar o índice estrutural é definir quantas dimensões "infinitas" ou razoavelmente grandes estão presentes no modelo e subtrair este valor do índice estrutural máximo para um campo dado que, para dados magnéticos, corresponde ao índice de valor 3.

Neste trabalho, foi executado o algoritmo sobre a área de maior concentração de anomalias magnéticas (Figura 19). Foi utilizado o índice estrutural $N=1$, correspondente a corpo planar de duas dimensões (Tabela 1), que é o tipo de geometria que se espera encontrar na área, tendo em vista que o minério de ferro ocorre na região nas camadas de diamictito da Formação Nova Aurora.

Tabela 1. Modelos magnéticos e seus respectivos índices estruturais (N)

Modelo magnético	N
Linha de polos (contato)	0
Linha de polos (contato)	0,5
Linha de polos (soleira, dique)	1
Ponto polar (chaminé vertical)	2
Linha de dipolos (corpo 2D)	2
Ponto dipolar (corpos 3D)	3

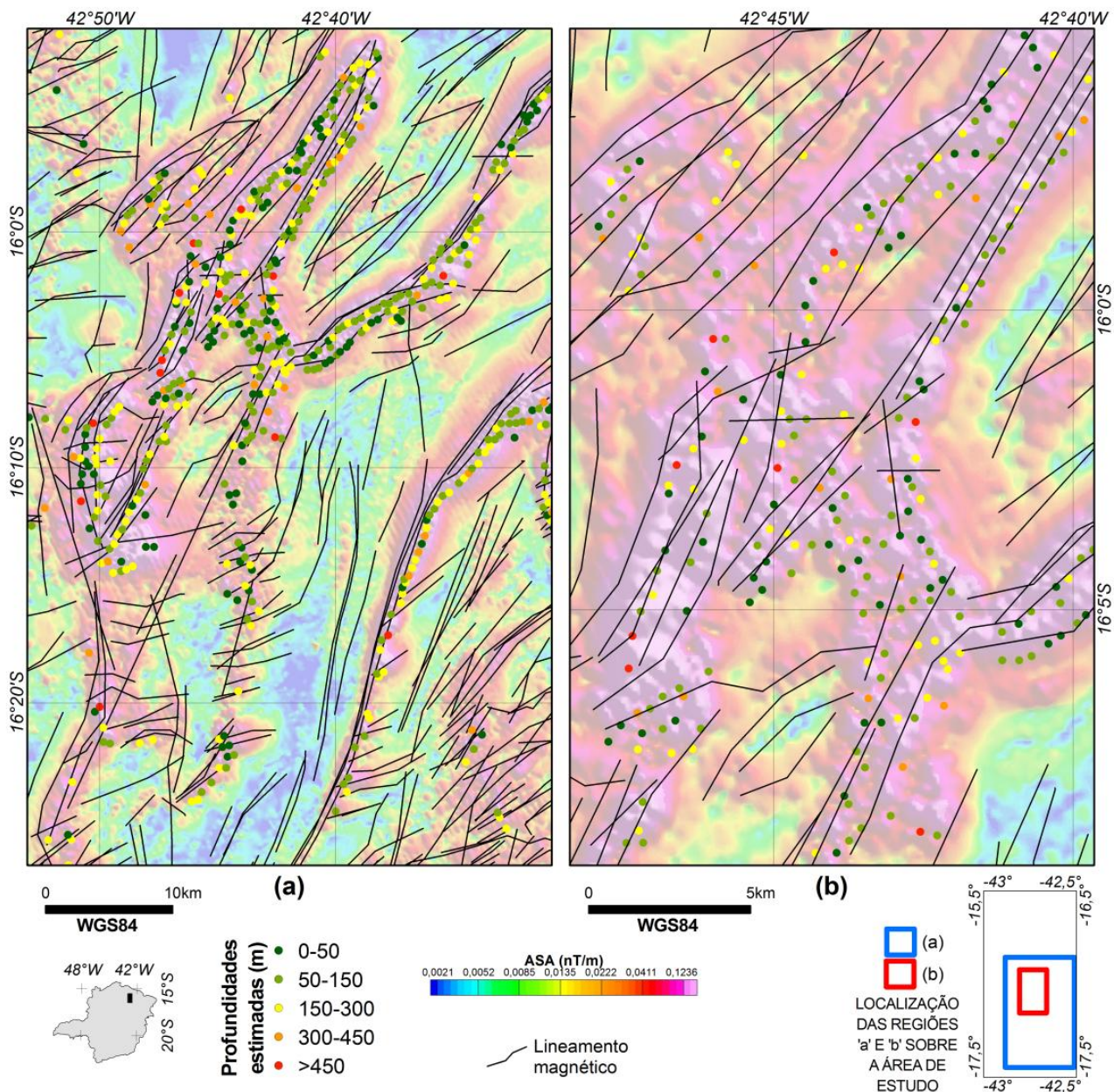


Figura 19. Resultado do processamento da deconvolução de Euler, mostrando soluções e as profundidades estimadas das fontes magnéticas para a áreas de detalhe 'a' e 'b', sobrepostas pelos lineamentos magnéticos interpretados.

O resultado deste processamento estimou profundidades para as fontes magnéticas entre 0 e 2,5km, sendo que cerca de 77% das soluções encontradas indicam profundidade de até 500m. Comparando-se com os quatro grupos de fontes magnéticas interpretados no gráfico de Espectro radial de Potência e suas profundidades (Figura 13), obteve-se cerca de 77% das fontes magnéticas em profundidades de até 0,5km, 17,5% entre 0,5 e 0,8km, 5% entre 0,8 e 1,3km e somente 0,5% em profundidades superiores a 1,3km. Pode-se observar que os pontos gerados pelas soluções encontradas na deconvolução se alinham segundo as direções interpretadas dos lineamentos.

4.2.2. Processamento dos dados geofísicos gamaespectrométricos

Os dados gamaespectrométricos foram utilizados considerando os baixos teores de radioelementos normalmente presentes nessas formações e a possibilidade de realçar alvos mascarados pelo intemperismo através de mapas de razões entre os três canais.

Assim como foi feito com os dados magnetométricos, foram efetuados testes de consistência com os dados gamaespectrométricos para se localizar e eliminar problemas relativos a ruídos gerados na aquisição dos dados (Figura 20).

Depois desta etapa inicial, foram geradas as imagens de contagem total (CT) e dos canais individuais para potássio (K), Tório (eTh) e Urânio (eU). Além disso, foram geradas imagens com as razões U/K, K/Th e Th/K, e as composições ternárias (RGB) a partir dos canais individuais e a partir do canal de potássio e as razões Th/K e U/K.

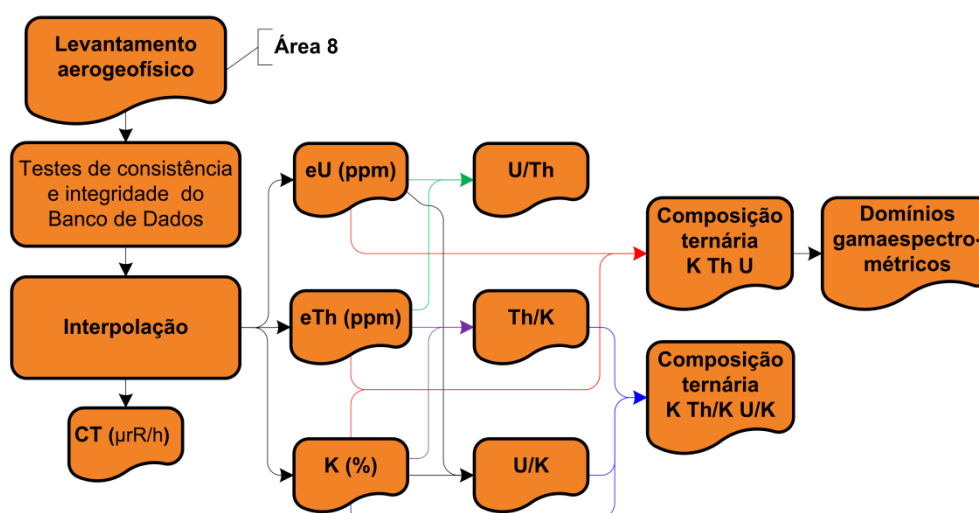


Figura 20. Fluxograma de processamento dos dados gamaespectrométricos.

4.2.2.1. Composição ternária e domínios gamaespectrométricos

A composição ternária permite que se analise proporcionalmente a contribuição de cada elemento e diferenciar domínios gamaespectrométricos (Figura 21). A partir de interpretação visual e por classificação supervisionada, foram individualizados 13 domínios (Figura 21a e b). As assinaturas geofísicas dos dados gamaespectrométricos são, ao contrário das assinaturas magnetométricas, mais facilmente correlacionáveis com as unidades mapeadas (Figura 9).

O embasamento, de idade arqueana a paleoproterozoica, aflora na porção oeste da área. É composto predominantemente por gnaisse e granitoides, com pouca ocorrência de anfibolito e metaultramáfica. Estas unidades podem ser correlacionadas aos domínios 5 (altos eU e %K, baixo eTh a leste da Serra geral), 6 (altos %K, eTh e eU), 7 (altos %K, eTh e eU, intercalados com altos %K e eU, baixo eTh) e 8 (altos eTh e eU intercalados com altos %K e eU - Figura 21a). Estas assinaturas são características para rochas graníticas *lato sensu*, mostrando altos valores para os três elementos.

Nesta região, as rochas do Supergrupo Espinhaço, mesoproterozoicas, são compostas principalmente por quartzitos puros a micáceos, com níveis locais ferruginosos. São correlacionáveis ao domínio 13 (baixos %K, eTh e eU - (Figura 21a). A assinatura mostrando baixos valores para os três elementos mostra a característica do conjunto de rochas, antigas, porosas, e que não possuem minerais ricos nestes radioelementos em sua composição.

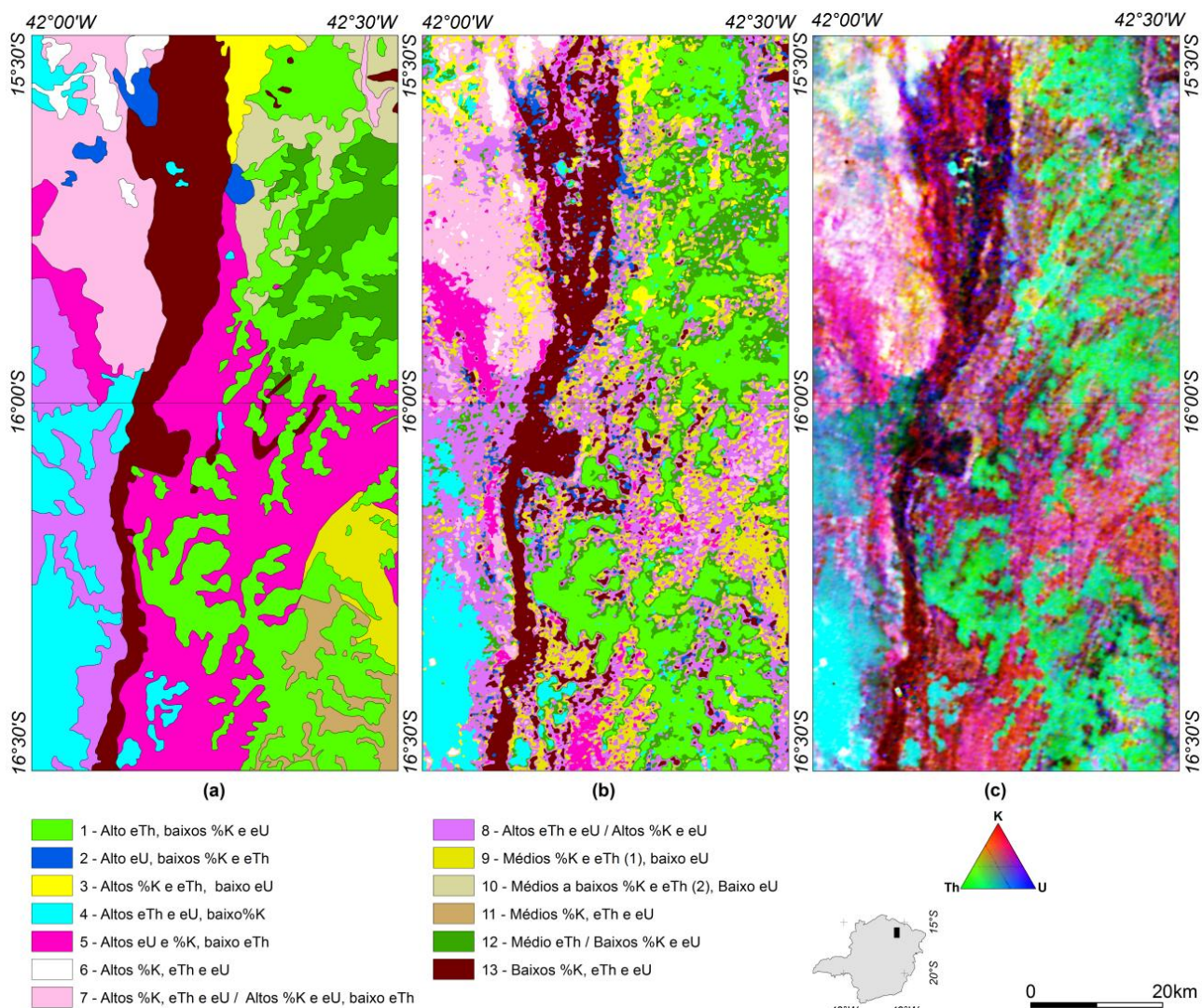


Figura 21. Domínios gamaespectrométricos sobre a área de estudo, resultado de interpretação visual (a), classificação supervisionada (b) e composição ternária criada a partir dos canais de potássio, tório e urânio.

O Grupo Macaúbas, aflorante na porção leste na área, é representado por quartzito puro, micáceo ou ferruginoso, xisto, metadiamictito com matriz quartzosa, quartzo-micácea ou ferruginosa, filito, metassilito e formação ferrífera. Esta diversidade de rochas se reflete na assinatura geofísica que não tem uma definição muito clara. Visualmente foram distinguidos os domínios 3 (altos %K e eTh, baixo eU), 5 (altos eU e %K, baixo eTh) a leste da Serra Geral, 10 (médios a baixos %K e eTh, baixo eU), 9 (médios %K e eTh, com concentrações um pouco acima das do domínio 10, baixo eU) e 11 (médios %K, eTh e eU), sendo que os domínios 9 e 11 coincidem aproximadamente com as áreas onde afloram as rochas da Formação Chapada Acauã (Figura 21a).

No mapa de domínios gerado a partir de classificação supervisionada (Figura 21b), se observa que os domínios aparecem de forma muito mais granulada, resultado da diversidade litológica do Grupo Macaúbas nesta região. Na porção central e centro-sul da área ocorrem manchas correspondentes ao domínio 13 (baixos %K, eTh e eU) que, nesta região, podem corresponder a rochas ricas em ferro, já que rochas ricas em ferro normalmente apresentam baixo teor destes três elementos.

Das coberturas que ocorrem na área, as coberturas elúvio-coluvionares são as que tem assinatura gamaespectrométrica mais marcante na região. São representadas pelos domínios 1 (alto eTh, baixos %K e eU) e 4 (altos eTh e eU, baixo %K - (Figura 21a). Observa-se que as extensas coberturas possuem assinatura diferente sobre a porção a oeste da Serra Geral, onde estas possuem uma concentração maior de urânio, enquanto que a leste da serra, as coberturas aparecem mais ricas em tório (Figura 21c).

Nos domínios interpretados visualmente, foi delimitado o domínio 12 (médio eTh / baixos %K e eU - Figura 21a) Figura 21 na porção nordeste da área. Este domínio é caracterizado por ainda uma predominância da concentração de tório em relação ao urânio, mas uma concentração relativamente menor que sobre o topo das coberturas. Pode-se interpretar que este domínio se refere a coberturas mais baixas, onde a dissecação e lixiviação já estão mais avançadas, mas ainda não foram suficientes para retirar todo o tório de sua composição. Observa-se que, no mapa de domínios gerado a partir de classificação supervisionada, este domínio aparece bordejando o domínio 1, rico em tório, correspondendo às bordas das coberturas, o que não foi possível delimitar na interpretação visual (Figura 21b).

4.2.2.2. Razões entre os canais gamaespectrométricos

Kileen (1979 *in*: Zacchi *et al.* 2010) apresenta os valores médios para concentrações de radioelementos em rochas sedimentares químicas (K-0,6%; U-3,6ppm; Th-14,9ppm), e Boyle (1982 *in*: Zacchi *et al.* 2010) apresenta os valores médios de urânio e tório para formações ferríferas bandadas (U-2ppm; Th-3ppm), teores comparativamente baixos nessas rochas. No entanto, estes elementos podem se mostrar em concentrações variáveis, devido ao grau de intemperismo das formações ferríferas. O potássio é geoquimicamente o mais móvel dos três elementos na maior parte das condições de intemperismo, e o urânio e o tório tendem a ser adsorvidos nos minerais de argila, e precipitados com óxidos de ferro nos solos (Wilford *et al.* 1997 *in*: Zacchi *et al.* 2010). Assim, o urânio tende a se concentrar em porções mais superficiais do solo, ao passo que as lateritas e bauxitas podem concentrar altos teores de tório (Boyle 1982 *in*: Zacchi *et al.* 2010).

As variações nas concentrações dos radioelementos podem ser realçadas através da aplicação de razões entre os três canais. As razões frequentemente mostram feições sutis que não são

aparentes quando esses dados são analisados isoladamente. No caso das formações ferríferas, a razão entre eTh/K realça concentrações anômalas de tório que estão relacionadas com extensos platôs de laterita, enquanto a razão eU/K destaca coberturas de solo e depósitos de colúvio, produto do intemperismo dessas rochas (Figura 22^a e b). A composição ternária com os canais de potássio, tório e urânio mostra as diferentes proporções destes elementos na superfície (Figura 22c). A combinação das razões com o canal do K em uma composição ternária permite separar esses produtos das sequências metassedimentares clásticas e das rochas do embasamento a que estão associadas (Figura 22d).

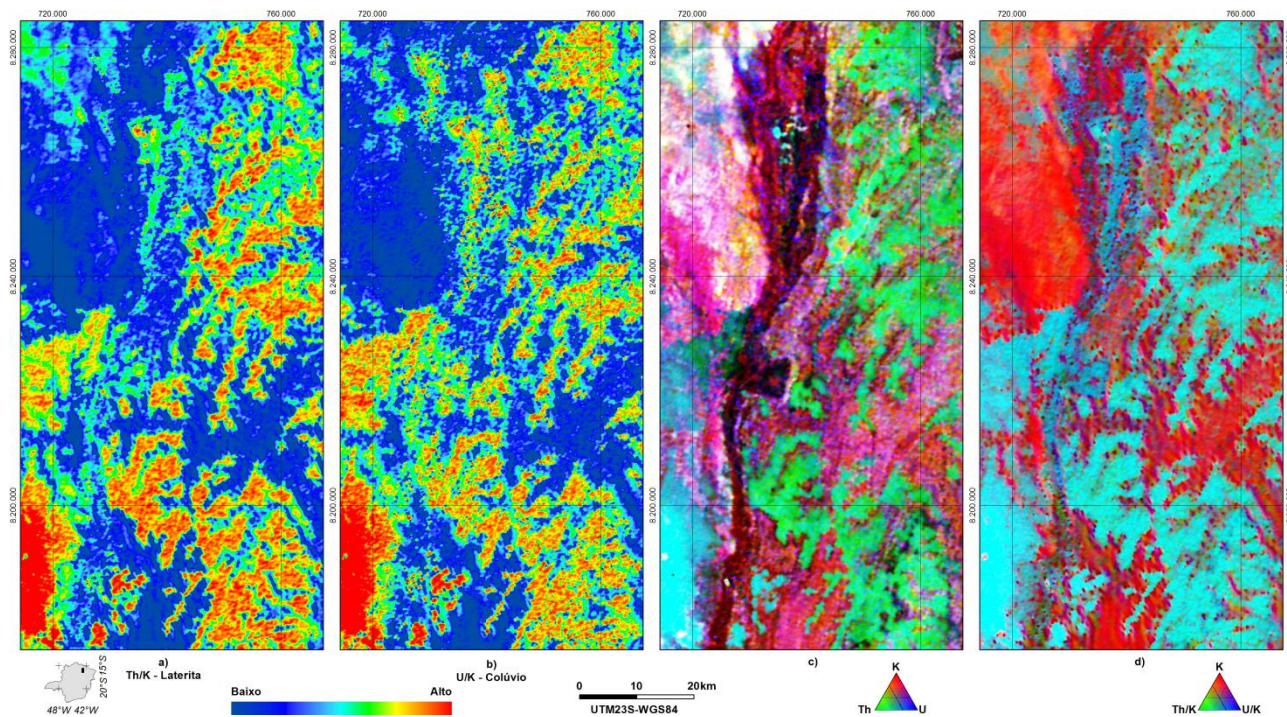


Figura 22. Resultado do cálculo das razões entre os canais de tório e potássio (a), entre urânio e potássio (b), composição ternária criada a partir dos canais de potássio, tório e urânio (c) e composição ternária criada a partir do canal de potássio e das razões entre os canais de tório e potássio e entre os de urânio e potássio(d).

4.3. Imagem de satélite Landsat 8

As imagens "Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)" consistem de nove bandas espectrais com resolução espacial de 30m (bandas 1 a 7 e 9), 15m (banda 8, pancromática) e 100m (bandas 10 e 11, termais). Cada cena tem o tamanho aproximado de 170km (N-S) por 183km (EW). Os parâmetros básicos para as imagens estão descritos na Tabela 2.

Neste trabalho foram utilizadas as cenas 217-71 (aquisição em 1/7/2013) e 218-71 (aquisição em 21/5/2013), escolhidas em função da época do ano e ausência de cobertura de nuvens. Estas imagens foram mosaicadas e recortadas segundo a área de interesse (Figura 23). A resolução espectral deste sensor foi determinante para sua escolha, já que os íons de ferro têm importantes feições de absorção ao longo do espectro eletromagnético que coincidem com os intervalos espectrais de suas bandas.

Tabela 2 - Parâmetros básicos da imagem OLI e TIRS do satélite Landsat 8

Resolução	Espacial	B1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 9 - 30m B 8 - 15m B10 e 11 - 100m (reamostrada para 30m)
	Espectral (µm)	B 1 - 0,43-0,45 B 2 - 0,45-0,51 (azul) B 3 - 0,53-0,59 (verde) B 4 - 0,64-0,67 (vermelho) B 5 - 0,85-0,88 (IV próximo) B 6 - 1,57-1,65 (infravermelho médio) B 7 - 2,11-2,29 (infravermelho médio) B 8 - 0,5-0,68 (pancromática) B 9 - 1,36-1,38 B 10 - 10,6-11,19 (infravermelho termal) B 11 - 11,5-12,51 (infravermelho termal)
	radiométrica	Coleta - 12b, disponibilização - 16b
	temporal	16 dias
Parâmetros cartográficos	Projeção Universal Transversa de Mercator (Estereográfica Polar para a Antártica) Datum WGS84 Imagens ortoretificadas (precisão cartográfica de 12m, 90% de confiança - OLI, 41m, 90% de confiança - TIRS)	
Órbita	descendente (horário no equador entre 10h e 10h15min)	
Cobertura	81° de latitude norte até 81° de latitude sul	
Dimensão	170km (N-S) x 183km (E-W)	

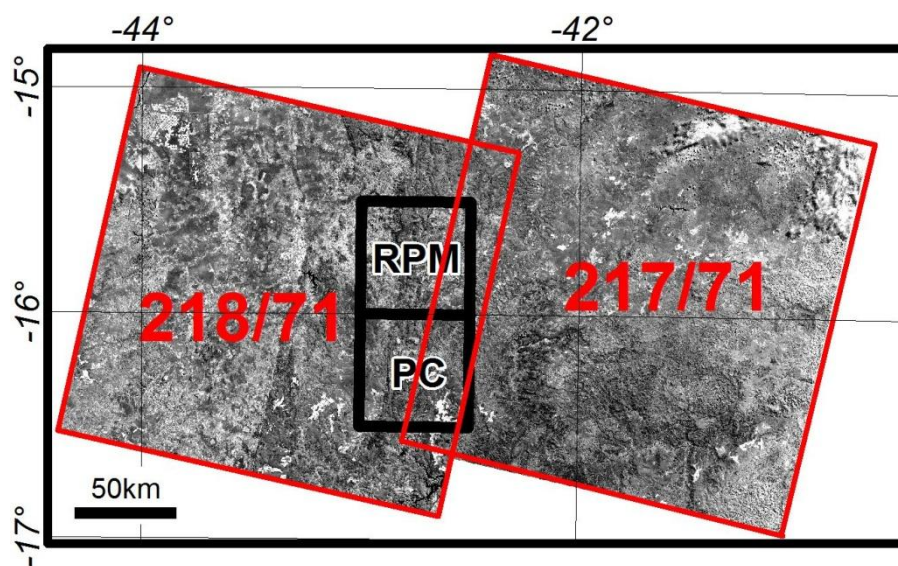


Figura 23. Imagem Landsat 8 sobre a área de estudo (banda 4), mostrando as imagens utilizadas para este trabalho (218/71 e 217/71) e no detalhe a localização da área de trabalho sobre elas (RPM - Folha Rio Pardo de Minas, PC - Folha Padre Carvalho)

A tentativa neste trabalho foi realçar as regiões que possuem maior concentração do óxido de ferro em superfície analisando os espectros eletromagnéticos da hematita, da vegetação seca e de vegetação densa e comparando-os em relação às bandas espectrais do satélite Landsat (Figura 24).

Foi gerada uma série de produtos a partir de técnicas de processamento digital de imagem, como análise por componentes principais, operações aritméticas (razões de banda) e composições coloridas (Figura 25). Os resultados destes processamentos foram analisados e interpretados em relação à capacidade de discriminação de áreas com elevadas concentrações de ferro na área.

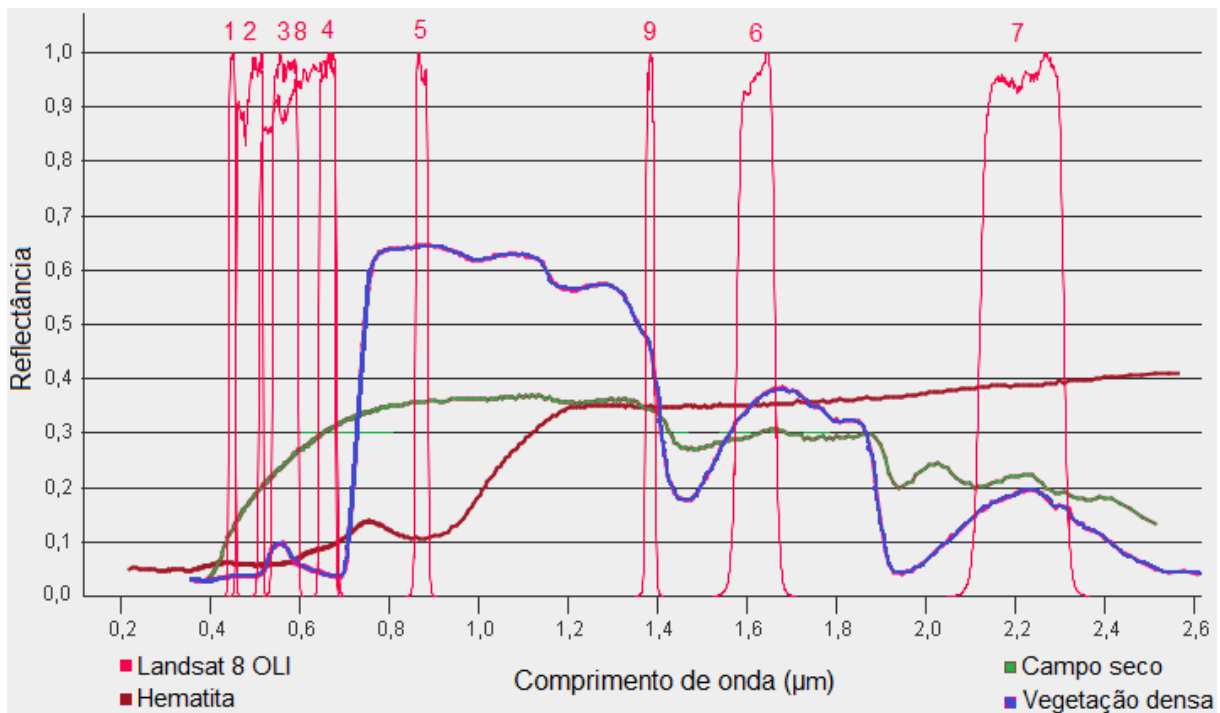


Figura 24. Gráfico mostrando as posições das bandas do satélite Landsat 8 no espectro eletromagnético e as curvas espectrais da hematita, vegetação de campo seco e vegetação densa (USGS 2013).

De acordo com Vilela (2010) o ferro ocorre na região nos metadiamicritos da Formação Nova Aurora, na forma de hematita especular em zonas de cisalhamento, hematita fina disseminada na matriz, além de magnetita em menor ou maior quantidade também disseminada na matriz do metadiamicrito.

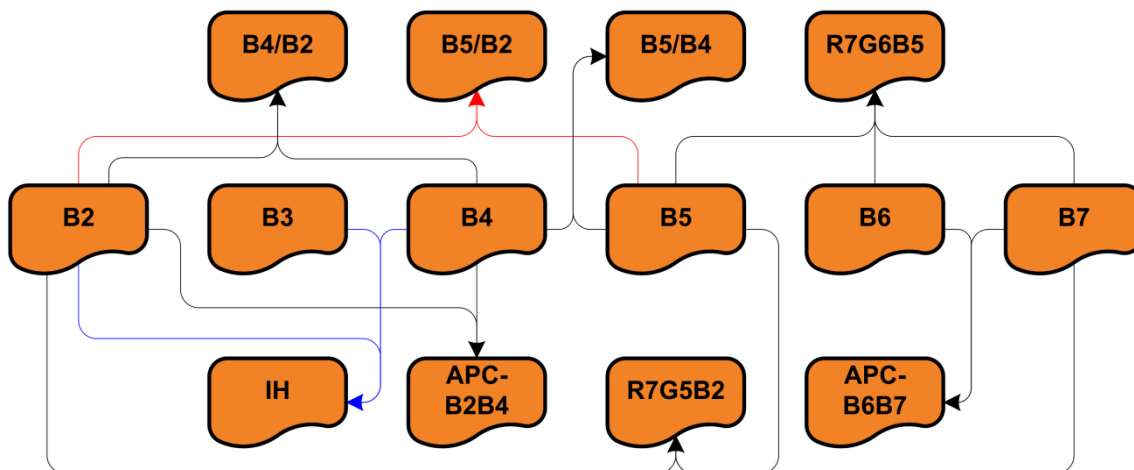


Figura 25. Fluxograma mostrando os produtos gerados a partir da imagem Landsat 8 (B4/B2, B5/B2 e B5/B4: razões entre bandas; R7G6B5 e R7G5B2: composições coloridas; APC-B2B4 e APC-B6B7: análise por componentes principais entre as bandas; IH: índice para realce de hematita).

A imagem Landsat 8 tem uma resolução espectral de 11 bandas, o que a torna ferramenta importante para distinção de alvos, já que as respostas diferentes de cada um ao longo do espectro facilitam a distinção ou identificação destes. Entretanto, é um desafio fazer esta distinção quando se utiliza somente um subconjunto destes dados, como em composições coloridas, onde somente três destas bandas são combinadas para se gerar uma imagem para análise. Além de se trabalhar com

uma porção reduzida do espectro, as informações redundantes que existem entre as bandas podem mascarar a informação, dificultando a distinção dos alvos.

4.3.1. Razões entre bandas e composições coloridas

As razões de banda são operações aritméticas utilizadas para reduzir os efeitos que degradam a informação espectral e realçar a informação procurada. Óxidos e hidróxidos de ferro normalmente apresentam absorções nas bandas 2 (0,45-0,51 μm) e 5 (0,85-0,88 μm) e maior reflectância nas bandas 4 (0,64-0,67 μm) e 6 (1,57-1,65 μm).

Várias razões foram testadas, aquelas encontradas na literatura e outras tentativas escolhidas em função da observação da curva espectral da hematita comparada às posições das bandas do sensor Landsat 8. As razões 4/2, 5/2 e 5/4 foram escolhidas como o melhor resultado para a geração da composição colorida, com a razão 4/2 representando o contraste espectral da hematita e as razões 5/2 e 5/4 representando a cobertura vegetal (Figura 26).

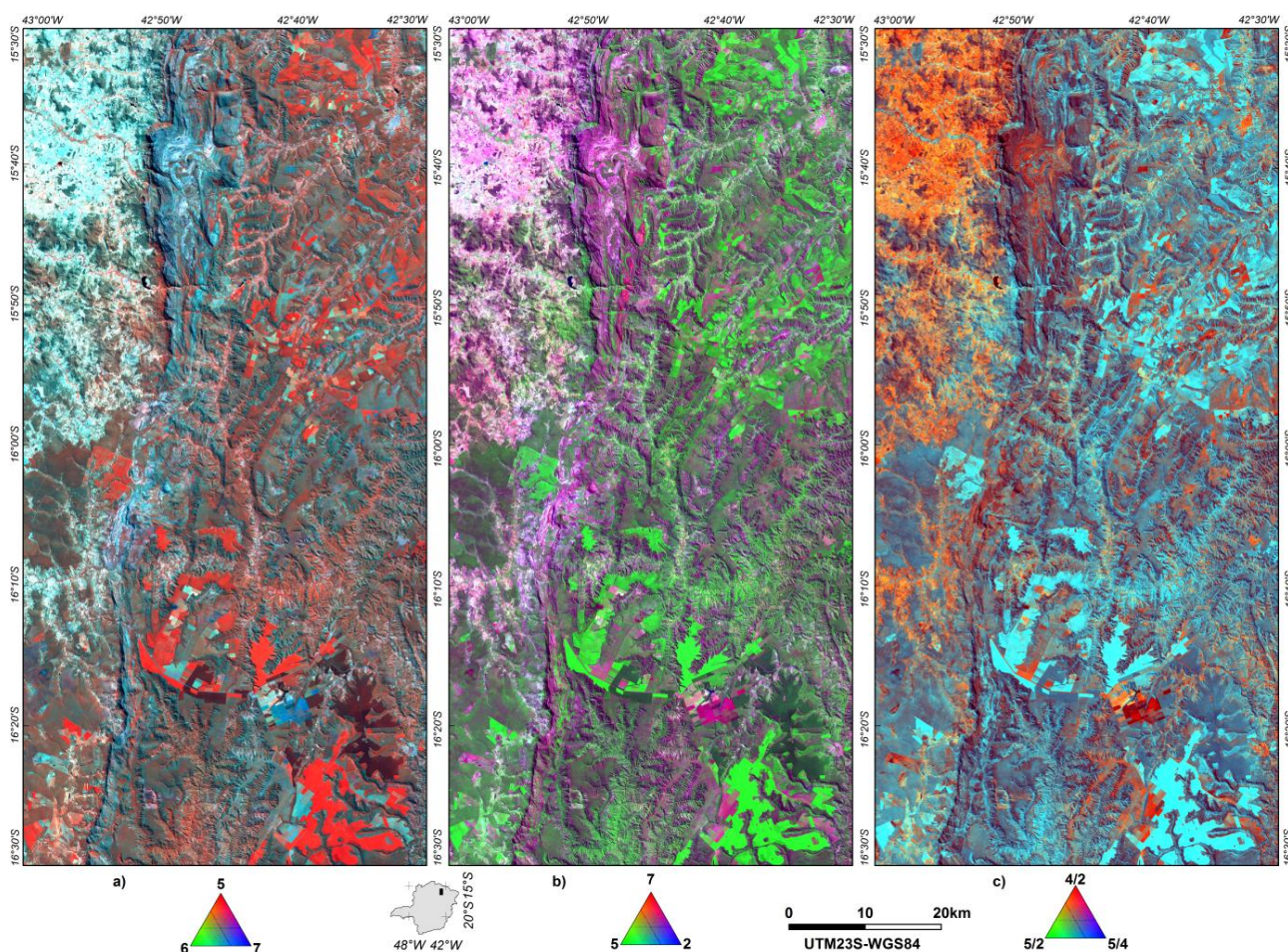


Figura 26. Composições coloridas das bandas 567 (a) e 752 (b) do satélite Landsat 8, onde alvos ricos em óxidos ou hidróxidos de ferro estão representados nas áreas em cor ciano (a) ou magenta (b). Composição colorida das razões de bandas 4/2, 5/2 e 6/4 do satélite Landsat 8, onde alvos ricos em óxidos ou hidróxidos de ferro estão representados nas áreas em cor vermelha (c).

As composições coloridas são geradas pelo conjunto de três bandas onde a cada uma é associada uma cor primária (vermelho, verde e azul). Analisando a assinatura espectral do alvo desejado, pode-se decidir qual ou quais seriam as melhores composições para sua identificação.

Observando estes fatores, foram escolhidas as composições 567, 752 e as razões 4/2-5/2-5/4.

Na composição 567, na qual a hematita mostra alta absorção na banda 5 e alta reflectância nas bandas 6 e 7, se observa que alvos ricos em hematita devem mostrar a cor ciano, composição das cores verde e azul (Figura 26a). Na composição 752 a hematita exibe alta absorção na banda 5, e na banda 2, apesar de a reflectância ser mais baixa que a de campo seco, ainda é mais alta que a reflectância da vegetação densa. Mostra ainda alta reflectância na banda 7. Os alvos ricos em hematita devem ser destacados em magenta (Figura 26b). Além disso foi gerada a composição colorida para as razões 4/2-5/2-5/4. À razão 4/2, representando o contraste espectral do ferro, foi atribuída a cor vermelha, enquanto que às razões 5/2 e 5/4, foram atribuídas as cores verde e azul, respectivamente (Zacchi *et al.* 2010 - Figura 26c).

4.3.2. Análise por componentes Principais

Uma técnica utilizada para se combinar bandas espectrais, realçando os contrastes é a análise por componentes principais (APC). Este método é utilizado para eliminar redundâncias e tornar possível escolher suas formas mais representativas fazendo combinações lineares das variáveis originais. A APC faz a transformação de variáveis discretas em coeficientes sem correlação. É uma transformação matemática que gera novas imagens que são combinações lineares das imagens originais.

A APC pode ser aplicada às oito bandas espectrais do satélite Landsat 8 e somente os três primeiros componentes seriam utilizados para se gerar a composição colorida, análises digitais ou classificação (Chavez & Kwarteng 1989). Estas três imagens terão um grande percentual da variância presente em todo o conjunto. Entretanto, Chavez & Kwarteng (1989) ressaltam que uma composição colorida gerada desta forma pode ser de difícil interpretação e informações não mapeadas nos três primeiros componentes podem ter interesse significativo, dependendo do grau de correlação e contraste espectral que existe ao longo das oito bandas.

Os autores propõem a utilização da técnica *Selective Principal Component Analysis* (Chavez & Kwarteng 1989), na qual se utiliza apenas um par de imagens, escolhidas a partir da matriz de correlação entre as bandas e do comportamento espectral do alvo procurado.

Quando o interesse é realçar uma informação que é única em uma banda espectral, o objetivo é simplificar as imagens eliminando as informações redundantes e isolando a informação desejada. Neste caso, se utiliza como entrada um par de imagens com correlação média (0,7 a 0,98) a baixa (<0,7) e o segundo componente gerado é o utilizado.

O primeiro componente terá a informação que é comum às duas imagens (como sombreamento topográfico ou albedo), enquanto que o segundo componente conterá as diferenças ou contrastes entre as duas imagens.

Para se realçar óxidos e hidróxidos de ferro, foi feita a APC para as bandas 2 e 4 e para se mapear superfícies ricas em argilo-minerais foi feita a APC com as bandas 6 e 7 (Zacchi *et al.* 2010). Em ambos os casos foi utilizado o segundo componente da cada análise, que traz a informação mais contrastante entre elas (Figura 27a e b).

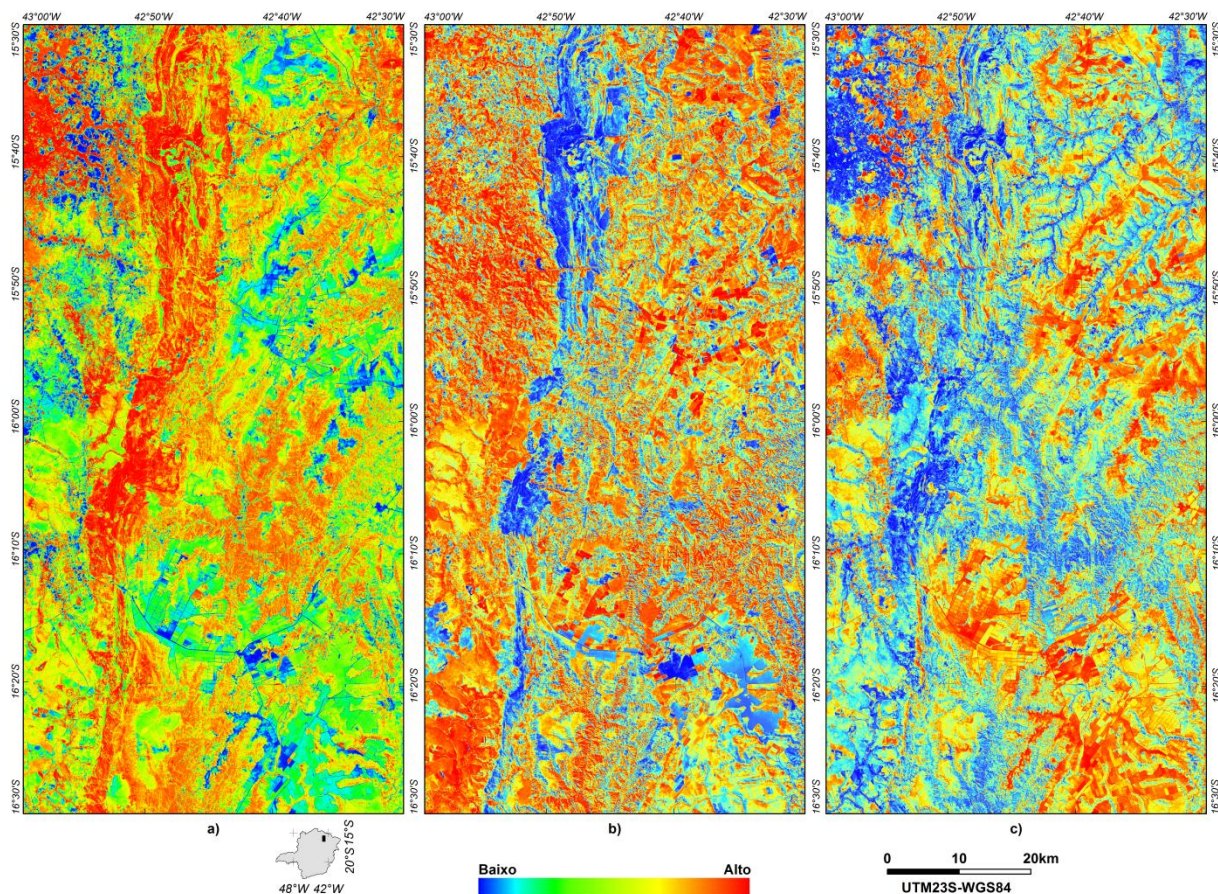


Figura 27. Análise de Componente Principal seletiva para realce de Óxido-Hidróxido de Ferro (a), argilo-minerais (b) e índice de realce para hematita em solo (c)

4.3.3. Índice para realce de hematita

Zacchi *et al.* (2010) sugerem o cálculo do índice para realce de hematita em solo, originalmente proposto por Madeira-Netto *et al.* (1993, *in*: Zacchi *et al.* 2010) utilizando as bandas visíveis do sensor, calculado como:

$$IH = \frac{(B4)^2}{(B3)^3 \times (B2)}$$

Onde IH= índice para realce de hematita;

B2, B3, B4 (sensor Landsat 7) \approx B2, B3, B4 (para o sensor Landsat 8)

A Figura 27c mostra a imagem com o resultado do cálculo do índice de realce para hematita no solo sobre a área de estudo.

4.4. Modelo digital de terreno: SRTM

A Missão do ônibus espacial de topografia por radar (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM) é um projeto internacional liderado pela Agência Nacional de Inteligência Geoespacial e pela NASA, dos Estados Unidos, executada pelo ônibus espacial Endeavour durante 11 dias em fevereiro de 2000, seu objetivo foi obter a mais completa base de dados topográfica digital de alta resolução da Terra. O produto foi gerado a partir de dados de radar, obtidos de sensores a bordo do ônibus espacial. Os dados foram processados pela NASA, e disponibilizados de forma gratuita, com resolução espacial de 90m, através do United States Geological Survey's EROS Data Center. A cobertura dos dados abrange a maior parte da superfície emersa da Terra entre as latitudes 60° Norte e 56° Sul (USGS 2004).

Neste trabalho, o modelo digital de terreno foi utilizado, juntamente com o relevo sombreado, seu produto derivado, para análise e interpretação da configuração geomorfológica da região (Figura 2).

4.5. Modelagem espacial

4.5.1. Formação ferrífera Diamictítica

As unidades das formações Serra do Catuni, Nova Aurora e Chapada Acauã Inferior, do Grupo Macaúbas, contêm diamictitos interpretados como depósitos glaciogênicos. Pode-se interpretar que a Formação Nova Aurora seria uma correlação distal da Formação Serra do Catuni e, em parte, uma equivalente lateral da Formação Chapada Acauã Inferior (Pedrosa-Soares *et al.* 2011a). As rochas desta formação se compõem predominantemente de metadiamicrito, com quartzito e filito subordinados. O Membro Riacho Poções, unidade ferruginosa, está subordinado à formação, e é formado por metadiamicrito hematítico com intercalações de quartzito e filito hematíticos.

A porção basal da Formação Nova Aurora, de acordo com dados de furos de sonda, é composta essencialmente pelas unidades ferruginosas, sobrepostas por pacote de metadiamicrito não ferruginoso (Vilela 2010). O Membro Riacho Poções, rico em metadiamicritos ferruginosos, foi individualizado como portador do minério de ferro da Formação Nova Aurora (Viveiros *et al.* 1978).

A espessura da formação já foi estimada entre 1000 e 3000m, enquanto que a do Membro Riacho Poções foi estimada como sendo de até 600m, sendo que a deformação regional torna difícil

uma avaliação precisa (Viveiros *et al.* 1978; Grossi-Sad *et al.* 1997, Uhlein *et al.* 1999, 1998, In: Vilela 2010).

Viveiros *et al.* (1978) interpretam os metadiamicítos hematíticos como um nível ferruginoso dobrado em sinclinal e anticlinal conjugado. Já Mourão *et al.* (1996) interpretam o Membro Riacho Poções como dois horizontes hematíticos principais dobrados, um em sinclinal e anticlinal e outro em braquissinclinal.

As formações ferríferas do Membro Riacho Poções são metadiamicítos enriquecidos em ferro por processos tectono-metamórficos relacionados à Orogenia Brasileira. A concentração primária de ferro nas camadas diamicíticas parece estar relacionada a processos glaciogênicos, embora não se descarte uma possível contribuição relacionada a vulcanismo (Vilela 2010).

O contato basal do Membro Riacho Poções é caracterizado por uma zona de cisalhamento dúctil. Próximo ao contato há recristalização de especularita e/ou magnetita, atingindo quantidade de até 60% (em volume) da matriz do metadiamicítito hematítico, com porfiroblastos de magnetita de granulação grossa (> 1mm), geralmente deformados e rotacionados. A partir do contato basal, rico em especularita e/ou magnetita, há predominância de metadiamicítito hematítico com teor de ferro variável, que decresce rumo ao topo.

4.5.2. Modelos guiados pelo conhecimento

A proposta para este trabalho é a criação de modelo prospectivo para minério de ferro na região estudada. Para este fim, foram combinados dados espaciais para reduzir a ambiguidade nas interpretações que normalmente aparecem quando se analisa os dados de forma individual.

A seleção de áreas potenciais para pesquisa para minério de ferro foi feita com o desenvolvimento de um modelo baseado em conhecimento, empírico, implementado a partir de conhecimento prévio (Câmara *et al.* 2001). Neste caso, se dispõe de um conjunto de informações de entrada que vai permitir a delimitação de áreas que vão satisfazer critérios pré-definidos de acordo com o conhecimento do modelo metalogenético do minério.

O modelo *booleano* envolve a combinação lógica de mapas binários, nos quais cada um possui informação que é utilizada como condição para que a hipótese levantada seja satisfeita. Como exemplo, a hipótese de que a área é ou não favorável à prospecção de minério de ferro, onde se atribui respectivamente os valores 1 ou 0 para cada classe. O conjunto de mapas é combinado de forma a gerar um resultado que é expresso também de forma binária, onde existem os valores 0 (hipótese não satisfeita) ou 1 (hipótese satisfeita).

Já no modelo de lógica *fuzzy* o conjunto de mapas tem seu grau de pertinência aumentando de forma contínua entre 0 e 1. O resultado gerado é um mapa cujos valores variam entre 0 e 1 e

indicam maior favorabilidade ao fenômeno estudado quanto mais próximo de 1 for este valor. É um modelo de caracterização de classes que é adequado para quando se trabalha com dados onde não há como se definir limites rígidos entre as classes (Câmara *et al.* 2001).

4.5.3. Modelagem dos dados

Os dados de sensoriamento remoto e de geofísica (gamaespectrométricos e magnetométricos) foram reclassificados e depois combinados utilizando-se operadores de lógica *fuzzy* (Figura 28).

A análise por lógica *fuzzy* segue os passos normais para análises que utilizam integração de dados espaciais, mas com metodologia um pouco diferente. Os passos gerais para uma análise deste tipo são os seguintes:

1. definição do problema;
2. subdivisão dos dados em sub-modelos;
3. determinação dos níveis significantes de informação;
4. reclassificação ou transformação do dado em cada nível de informação;
5. atribuição de pesos aos níveis de informação. Esta fase é descartada quando se utiliza a lógica *Fuzzy*, já que a atribuição de pesos se dá no momento da reclassificação;
6. adição ou combinação dos níveis de informação;
7. análise e interpretação dos resultados.

No passo 1, o problema é a definição de áreas favoráveis à prospecção de minério de ferro na região de interesse. O passo 2 está descrito nos itens 5.1 a 5.2 deste trabalho, que consiste na geração de produtos derivados dos dados de geofísica (magnetometria e gamaespectrometria) e sensoriamento remoto (imagens Landsat 8 e SRTM).

O passo 3 foi a seleção dos produtos mais significantes para a análise. A imagem de amplitude do sinal analítico (ASA - Figura 16) foi selecionada em função da alta susceptibilidade magnética existentes nos minérios da região, que contém hematita magnética e magnetita. Foram também selecionadas, derivadas dos dados gamaespectrométricos, as imagens das razões entre os canais de tório e potássio (Th/K) e entre urânio e potássio (U/K), que realçam as feições influenciadas pelo intemperismo, e a composição ternária entre os três canais (K-Th-U), que realçam as regiões onde estes radioelementos apresentam baixas concentrações, característica do minério de ferro (Figura 22).

Dos dados derivados do processamento das imagens Landsat 8, foram selecionadas as imagens com o cálculo do índice de realce de hematita em solo (IH), a análise de componente

principal seletiva para realce de Óxido-Hidróxido de Ferro (APC-Fe), e para realce de argilo-minerais (APC-arg - Figura 27).

O modelo digital de terreno foi descartado para esta análise, já que a localização dos depósitos da região não é condicionada pela altitude ou forma de relevo.

Estas imagens foram então reclassificadas, correspondendo ao passo 4 da análise. Para utilização da lógica *Fuzzy*, cada dado selecionado foi reclassificado transformando-se sua faixa de valores em uma faixa que varia de 0 a 1, onde 0 indica a menor favorabilidade, que aumenta até a máxima favorabilidade no valor 1. Foram utilizadas para este fim as funções *Fuzzy Large* e *Small*. A função de transformação *Large* é utilizada quando os valores mais altos em cada dado correspondem à maior favorabilidade do fenômeno estudado. Caso contrário, quando os valores mais baixos em cada dado correspondem à maior favorabilidade do fenômeno estudado, a função *Small* é utilizada.

Às imagens de ASA, Th/K, U/K, IH e APC-Fe foi aplicado o operador *Large*. À composição ternária K-Th-U e à APC-arg foi aplicado operador *fuzzy Small* (Figura 28).

As imagens reclassificadas IH e APC-Fe foram combinadas (passo 6) utilizando-se o produto algébrico *Fuzzy*, que é definido por (Bonham-Carter 1994 - Figura 28):

$$\mu = \prod_{i=1}^n \mu_i$$

onde μ_i =valor do membro *Fuzzy* para um plano de informação i e $i = 1,2,3...n$ são os mapas a serem combinados

As imagens reclassificadas de Th/K e U/K foram combinadas utilizando-se a soma algébrica *Fuzzy*, que é definida por (Bonham-Carter 1994 - Figura 28):

$$\mu = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

onde μ_i =valor do membro *Fuzzy* para um plano de informação i

As imagens resultantes foram finalmente combinadas utilizando-se o operador *Fuzzy gama*, que é definido por (Bonham-Carter 1994 - Figura 28):

$$\mu = \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right]^{\gamma} \times \left[\prod_{i=1}^n \mu_i \right]^{1-\gamma}$$

onde μ_i =valor do membro *Fuzzy* para um plano de informação i ; γ =índice de importância.

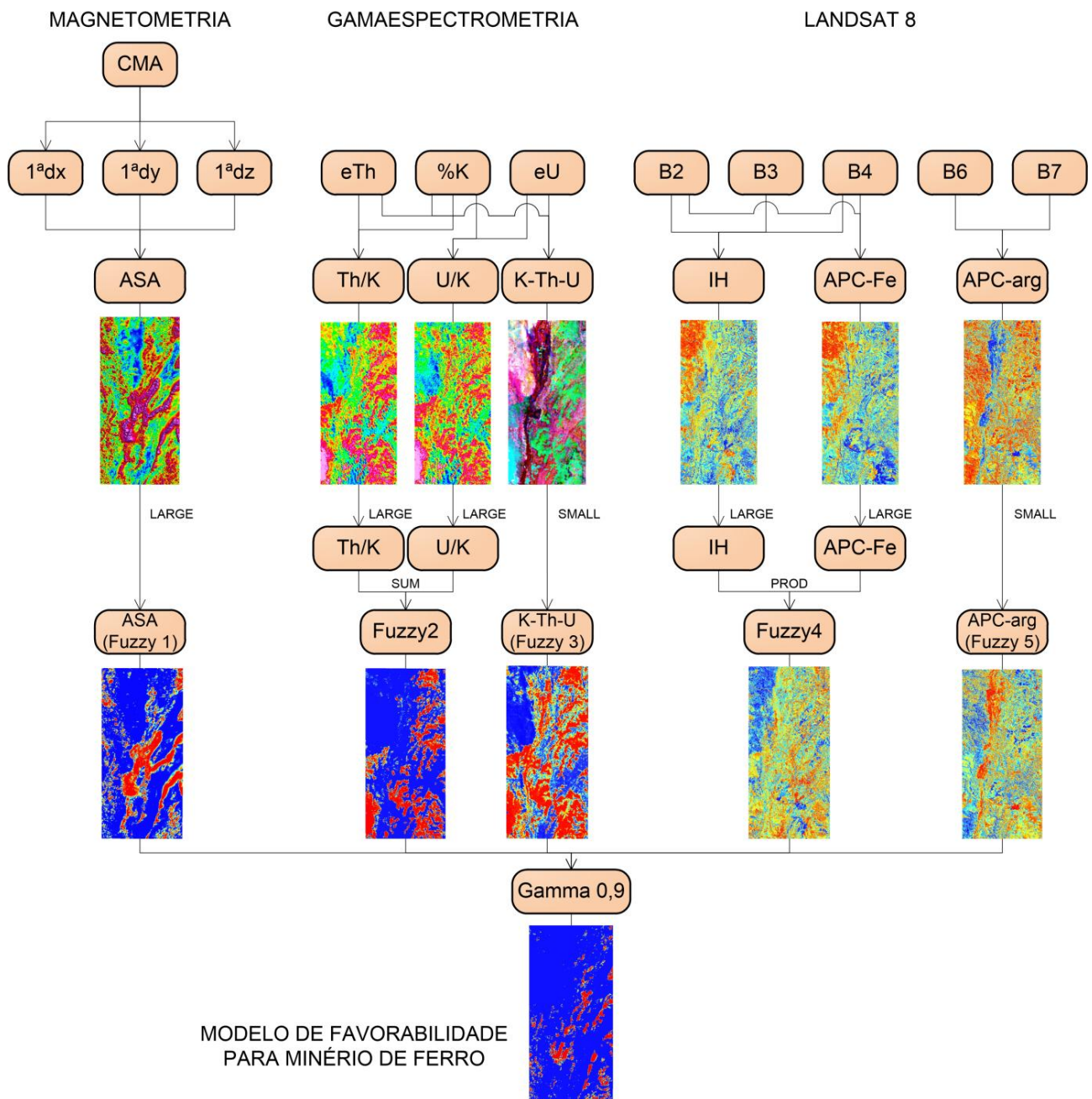


Figura 28. Fluxograma de processo para análise para geração prospectivo para minério de ferro, baseado em modelo guiado pelo conhecimento utilizando-se lógica Fuzzy.

O índice de importância γ , que varia entre os valores de 0 e 1, define a importância de cada membro do operador (Figura 29). Os resultados da função *Fuzzy gama* em relação à variação do índice γ , quando combinada uma série de imagens μ_i (com $i=1\dots n$, sendo μ_{\min} e μ_{\max} os valores mínimo e máximo em um ponto), mostram o efeito da variação de γ para a combinação dos valores em um ponto determinado.

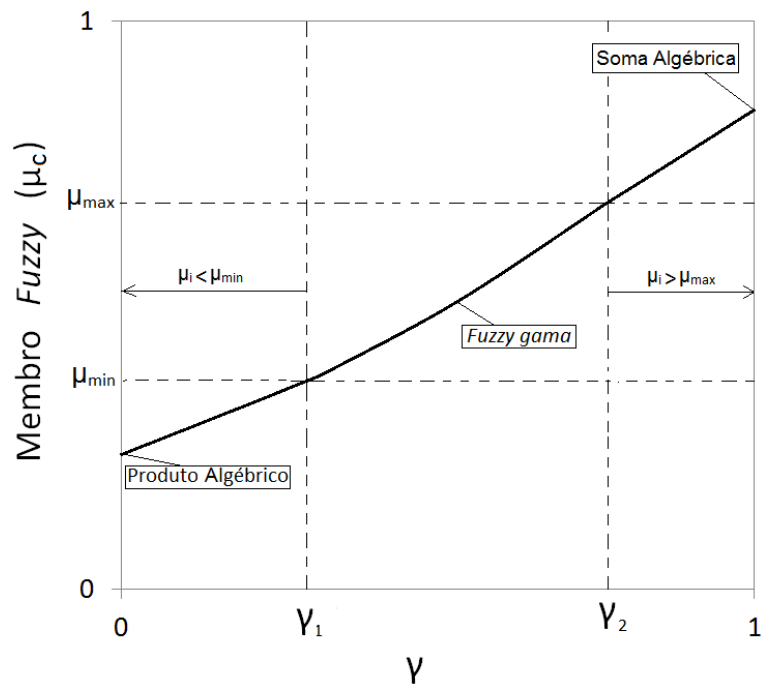


Figura 29. Gráfico mostrando os resultados da função *Fuzzy gama* em relação à variação do índice γ , quando combinada uma série de imagens μ_i (com $i=1\dots n$, sendo μ_{\min} e μ_{\max} os valores mínimo e máximo em um ponto, modificado de Bonham-Carter, 1994).

O cálculo é efetuado utilizando-se a assinatura de cada ponto. Quando $\gamma=0$, a combinação será igual ao produto algébrico *Fuzzy* para aquele ponto. Quando $\gamma=1$, será igual à soma algébrica *Fuzzy*. Quando $\gamma=\gamma_1$ ou $\gamma=\gamma_2$, os resultados da função serão iguais ao valor μ_{\min} ou μ_{\max} , respectivamente, naquele ponto. Para os valores $0<\gamma<\gamma_1$, os valores serão menores que o μ_{\min} e para $\gamma_2<\gamma<1$ os valores serão maiores que o μ_{\max} (Bonham-Carter 1994). Embora a tendência da curva seja sempre crescente, os valores de γ_1 e γ_2 para os quais o valor da combinação se torna sempre menor ou maior que os valores mínimos ($\gamma<\gamma_1$) e máximos ($\gamma>\gamma_2$) varia com os valores em cada assinatura. O índice γ então, é definido de acordo com o objetivo da análise e após vários testes. Valores altos de γ serão adequados quando o efeito do aumento de valores maiores pode realçar determinado fenômeno.

No caso deste trabalho, os dados foram modelados de forma que maiores valores reflitam maior favorabilidade para a ocorrência de minério de ferro. Sendo assim, depois de uma sequência de testes, o valor de γ definido para esta análise foi $\gamma=0,9$, que atribui maior importância ao termo "soma algébrica *Fuzzy*", que evidencia os maiores valores dos dados. A imagem resultante deste operador é o mapa de favorabilidade para minério de ferro na área de estudo (Figura 30).

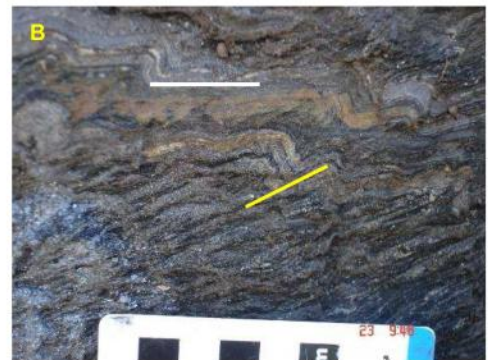
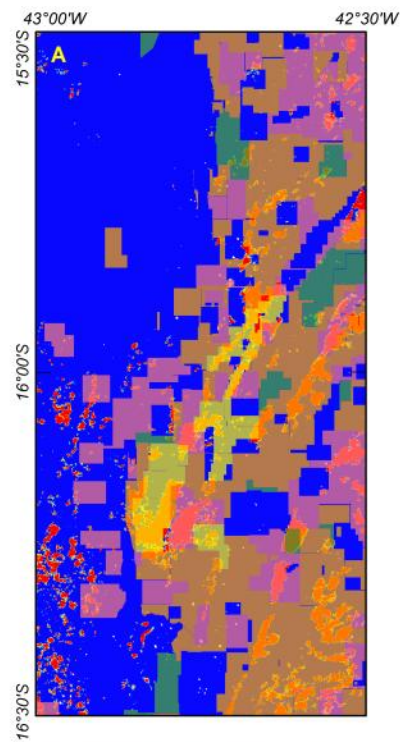
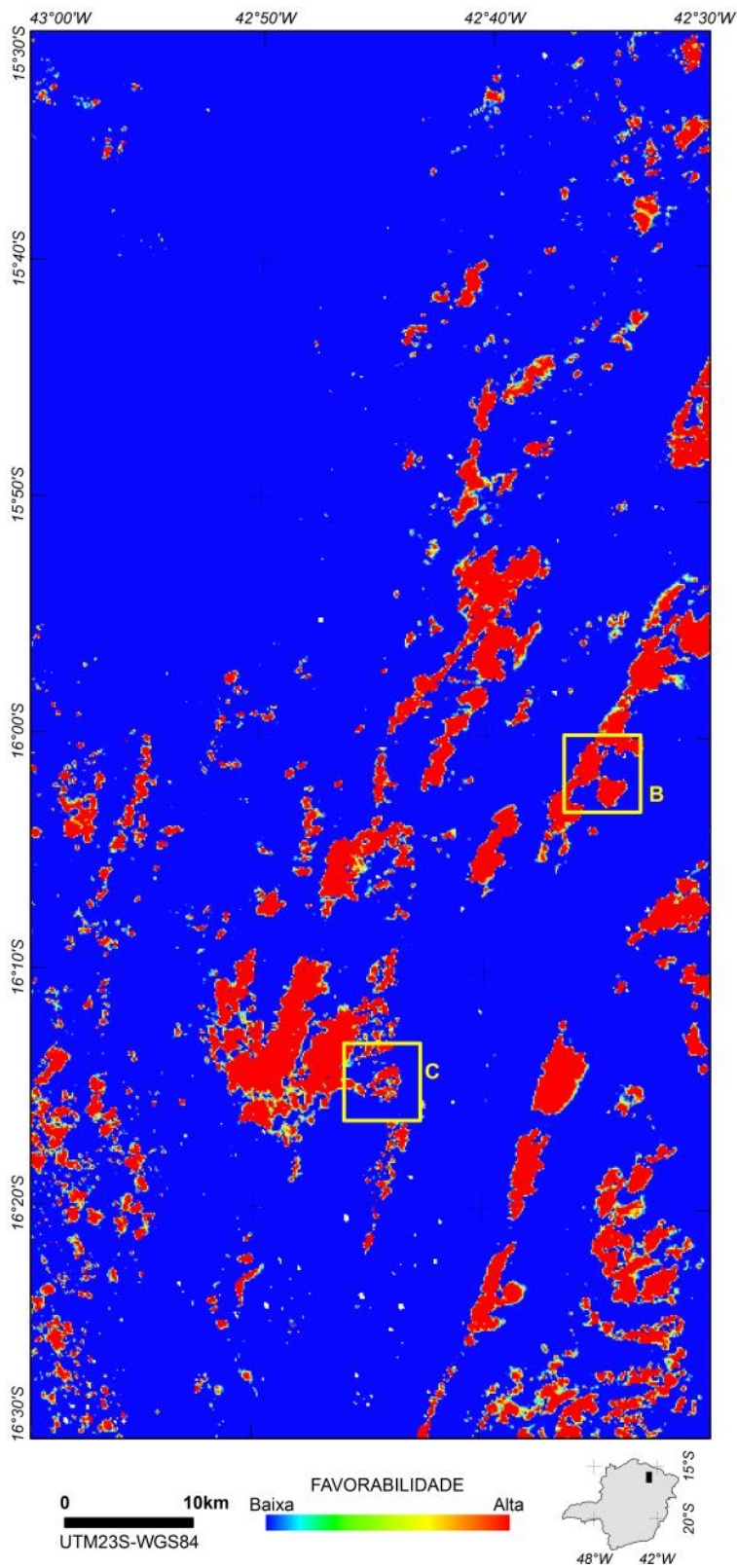


Figura 30. Modelo prospectivo para minério de ferro (à esquerda) mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção em vermelho. A) Requerimentos de lava (amarelo), autorizações de pesquisa (laranja), requerimentos de pesquisa (verde) e áreas em disponibilidade (rosa) para minério de ferro sobre a região de estudo. B) Afloramento de metadiamicctito hematítico, mostrando bandamento (S0) paralelo à foliação S1 (linha branca –S0//S1) e hematita concentrada em S2 (linha amarela), discordante de S0//S1 (Vilela 2010). C) Metadiamicctito hematítico com alta concentração de hematita especular (UTM23S-WGS84 740.468E, 8.201.919N).

Integração de dados aerogeofísicos e de sensores remotos aplicada à prospecção no Distrito Ferrífero Nova Aurora, Grupo Macaúbas, Norte de Minas Gerais

Geophysical and remote sensing data integration applied to mineral prospecting in the Nova Aurora Iron District, Macaúbas Group, Northern Minas Gerais State, Brazil

Eliane Voll¹, Antônio Carlos Pedrosa–Soares^{1,5}, Adalene Moreira Silva², Ranufo Arimatéia³, Eduardo Santos³, Francisco Teixeira Vilela⁴

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geologia, UFMG-IGC-CPMTC, Campus Pampulha, 31270-901 Belo Horizonte, MG. 31-34096334 (eliane.voll@gmail.com; pedrosoares@ufmg.br)

²Universidade de Brasília, UnB-IG-Laboratório de Geofísica Aplicada, Asa Norte, Brasília, DF (adalene@unb.br)

³Sul Americana de Metais S/A – SAM, Salinas, MG (Eduardo.Santos@sammetais.com.br, ranufo.arimateia@sammetais.com.br)

⁴Serviço Geológico do Brasil-CPRM, SUREG-BH, Belo Horizonte, MG (francisco.vilela@cprm.gov.br)

⁵Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq (pedrosa@pq.cnpq.br)

RESUMO

O Distrito Ferrífero Nova Aurora apresenta depósitos de ferro relacionados a metadiamictitos do Grupo Macaúbas, Membro Riacho Poções, Formação Nova Aurora, ricos em hematita e/ou magnetita disseminadas na matriz, com teores entre 13 e 60%_(peso) de Fe. Estes depósitos, irregularmente distribuídos, estão em maior parte recobertos por espessos solos de extensas chapadas. Este estudo aplica técnicas de processamento e integração de dados aerogeofísicos, geológicos e de sensoriamento remoto, visando subsidiar a prospecção no Distrito Ferrífero Nova Aurora. Foram criados os modelos prospectivos regional e local. No modelo regional, áreas favoráveis se apresentam como manchas dispersas, mas coerentes com a concentração dos processos minerários cadastrados no DNPM. O modelo local se mostrou coerente com os dados geológicos de superfície e furos de sondagem. As profundidades estimadas por Deconvolução de Euler indicam fontes magnéticas concordantes com as espessuras dos corpos de minério em seções geológicas controladas por sondagem. Exposições de minério em superfície coincidem com áreas de maior favorabilidade nos modelos. A grande extensão das coberturas elúvio-coluvionares mascara as formações ferríferas nos produtos gamaespectrométricos e de imagens de satélite, em decorrência da resposta ao material superficial. O dado aeromagnetométrico utilizado fornece informação referente a maiores profundidades mas, isolado, é insuficiente para delimitar em detalhe as áreas de favorabilidade à ocorrência de minério. A integração das informações mostra que, mesmo considerando a grande extensão das coberturas, é possível restringir as áreas mais indicadas para prospecção na região.

Palavras-chave: Minério de ferro; modelagem espacial; lógica *Fuzzy*; Grupo Macaúbas.

ABSTRACT

The Nova Aurora Iron District (Northern Minas Gerais State, Brazil) comprises iron deposits associated with metadiamictites of the Neoproterozoic Macaúbas Group. These deposits, included in the Riacho Poções Member, Nova Aurora Formation, consist of hematite and/or magnetite matrix-rich metadiamictites, which iron content range from 13 to 60 wt% Fe. They show irregular distribution and are mostly covered by the thick lateritic soils exposed on extensive plateaus, hiding their real lateral dimensions. This paper presents a geological, geophysical and remote sensing integrated study with the aim to support mineral prospecting from regional to local scale. The regional model show scattered favorable areas, with several high density concentration of probable iron ore deposits. In the local model, including field and borehole data, the Euler Deconvolution reveals magnetic source depths in agreement with the ore body thickness shown by borehole-controlled geological sections. This local integrated model also fits well with the iron ore outcrops visited in the field. The very extensive lateritic covers mask the lateral dimensions of the iron formations in gamma-spectrometry and Landsat 8 images, since these sensors mainly reflect the surface response of ground material. Magnetometry data may reveal the most favorable targets for iron ore prospecting, although it lacks enough detail for more specific studies. Integrated models may better constrain prospecting targets, specially in the extensive plateau areas.

Keywords: Iron Ore; Spatial modeling; Fuzzy Logic; Macaúbas Group.

1. INTRODUÇÃO

A área de estudo situa-se na região norte do Estado de Minas Gerais. É limitada pelas latitudes 15°30'S e 16°30'S, e longitudes 42°00'W e 42°30'W, correspondendo às folhas Padre Carvalho (SE.23-X-B-II) e Rio Pardo de Minas (SD.23-Z-D-V), em escala 1:100.000, localizadas a oeste de Salinas.

A área mostra dois domínios geomorfológicos distintos, controlados pela geologia. Na parte oeste situa-se o domínio da Serra do Espinhaço, sustentada por quartzitos. A leste se encontra um domínio de grandes chapadas, sustentadas por unidades ricas em metadiamicritos do Grupo Macaúbas. É neste domínio que se encontram os depósitos de ferro em metadiamicritos do Grupo Macaúbas, compondo o Distrito Ferrífero Nova Aurora (Vilela *et al.* 2014). Estes depósitos são englobados no Membro Riacho Poções da Formação Nova Aurora, Grupo Macaúbas (Viveiros *et al.* 1978, Grossi-Sad *et al.* 1997, Vilela, 2010, Pedrosa-Soares *et al.* 2011). São genericamente constituídos por metadiamicritos ricos em hematita e/ou magnetita como componentes da matriz, com teores de ferro entre 13 e 60%_(peso). Em termos econômicos, o Distrito Ferrífero Nova Aurora tornou-se alvo de importantes projetos de mineração, nos últimos anos, a exemplo daquele que vem sendo realizado pela Companhia Sul Americana de Metais (SAM).

O presente trabalho apresenta estudos sobre a aplicação local dos procedimentos de técnicas de processamento e análise integrada de dados aerogeofísicos de alta densidade de amostragem, de sensoriamento remoto orbital, modelo digital de terreno, informação de campo e dados de projetos de mapeamento geológico, visando contribuir para o desenvolvimento das atividades de prospecção mineral no Distrito Nova Aurora.

2. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS:

A área de estudo situa-se na confluência dos divisores de águas das bacias dos rios Médio São Francisco, Pardo e Jequitinhonha. A Bacia do Médio São Francisco está na porção noroeste da área, enquanto que a bacia do Rio Pardo se

encontra na porção nordeste. Seu divisor de águas, de direção NS, é a Serra do Espinhaço. A Bacia do Rio Jequitinhonha está ao sul destas duas e seu divisor de águas situa-se sobre as grandes chapadas da região (Figura 1).

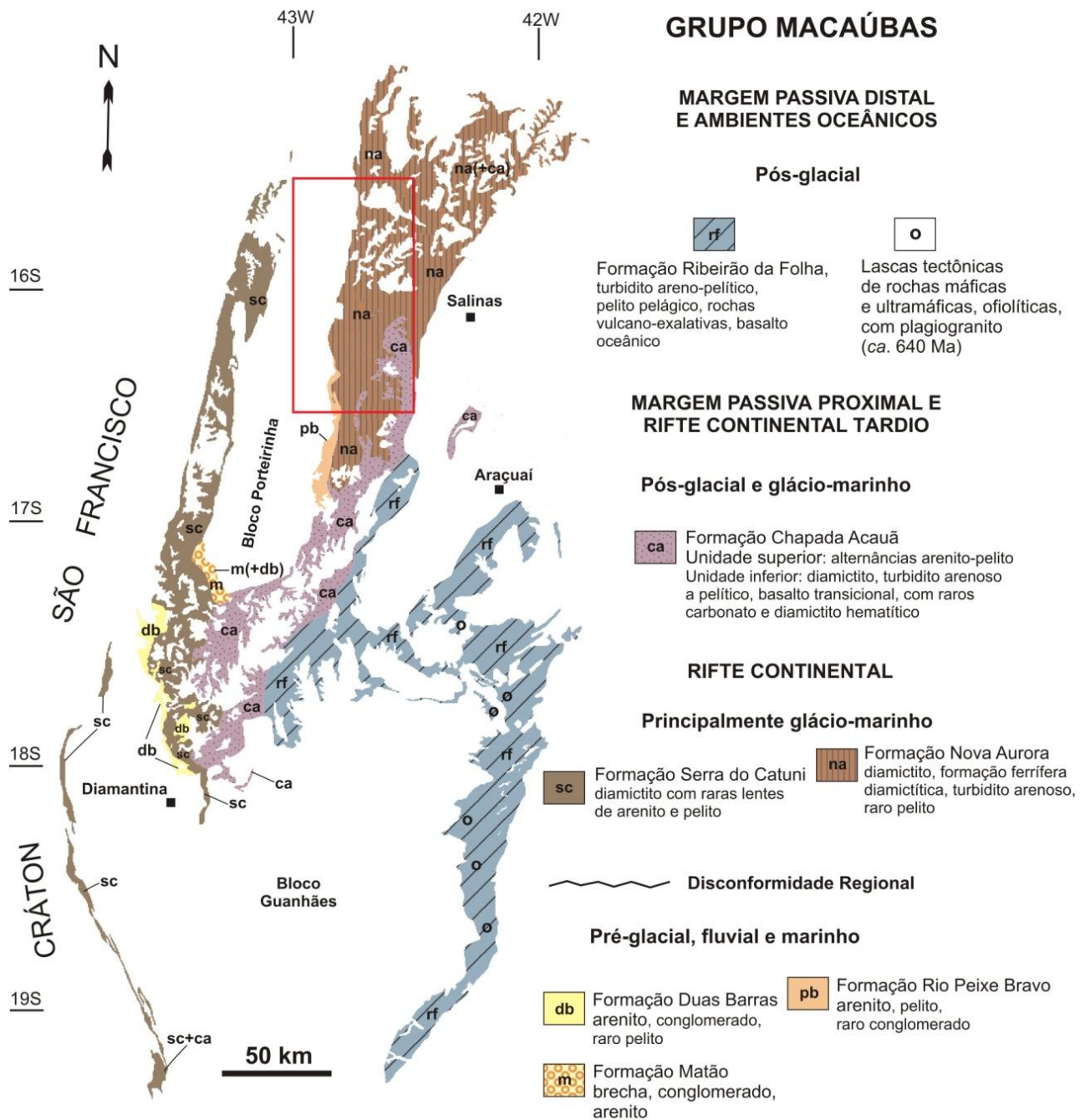
A maior parte da área estudada está contida no "Compartimento Morfoestrutural 1", correspondente ao Planalto da Serra do Espinhaço, resultante do aplainamento que resultou na "Superfície Sulamericana" (King 1956), o qual se desenvolveu sobre a parte do Grupo Macaúbas rica em metadiamicritos (Saadi & Pedrosa Soares (1990). King (1956) definiu o conjunto de chapadas e patamares como "áreas aplainadas com zonas dissecadas", resultando do "Ciclo Sulamericano", para os níveis de 800-900m, e do "Ciclo Velhas", para os níveis de 500-700m (Saadi 1995). Um segundo compartimento, denominado "Serras, Patamares e Escarpas do Espinhaço" é constituído por uma "sucessão de superfícies de aplainamento escalonadas, com escarpamentos orientados por fraturas", que seriam testemunhos do "Ciclo Pós-Gondwana" (Saadi 1995).

As chamadas "áreas aplainadas com zonas dissecadas" do "Ciclo Sulamericano", entre os níveis de 800-900m, são representadas por extensas chapadas, cujos solos elúvio-coluvionares cobrem essencialmente rochas do Grupo Macaúbas (Figura 1).

Estas chapadas estão sendo dissecadas por drenagens perenes e intermitentes, formando ravinas, onde podem aflorar as rochas subjacentes. As áreas resultantes do "Ciclo Velhas", entre os níveis de 500-700m, estão representadas pelas rochas graníticas e gnáissicas da Suíte Rio Itacambirucu e do Complexo Córrego do Cedro, a noroeste, e aos vales encaixados dos rios Peixe Bravo e Ventania, afluentes do Rio Jequitinhonha. O compartimento denominado "Serras, Patamares e Escarpas do Espinhaço", resultante do "Ciclo Pós-Gondwana", com altitudes entre 1.200 e 1.300m, é representado o alinhamento norte-sul das serras da Bocaina e Geral.

Membro Riacho Poções. Contudo, os levantamentos aerogeofísicos realizados pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG, Área 8, 2006) revelaram marcantes anomalias magnéticas, parte das quais corresponde aos metadiamicritos ferruginosos e formações ferríferas do Membro Riacho Poções, também onde estas rochas estão encobertas sob os chapadões da região.

Isso levou a uma verdadeira “corrida do ferro” na região de tal forma que, hoje, são conhecidas em sub-superfície extensões muito maiores das camadas de metadiamicritos ferruginosos e formações ferríferas associadas, em relação aos trabalhos prospectivos pioneiros de Viveiros *et al.* (1978).



Empresas, como a Sul Americana de Metais (SAM), Mineração Minas Bahia (MIBA) e VALE, têm trabalhos exploratórios avançados, sustentados por milhares de furos de sonda que revelam reservas superiores a vinte bilhões de toneladas de minério de ferro de baixo a médio teor, em uma região de baixíssima densidade demográfica (Vilela *et al.* 2014).

3.2. Geologia do Distrito Ferrífero Nova Aurora

As grandes unidades estratigráficas da região do Distrito Ferrífero Nova Aurora são as formações Rio Peixe Bravo, Nova Aurora e Chapada Acauã, do Grupo Macaúbas, e as coberturas cenozoicas que ocorrem em chapadas (Figuras 2 e 3). Os grandes depósitos de ferro parecem estar restritos ao Membro Riacho Poções da Formação Nova Aurora, embora existam ocorrências de formação ferrífera diamictítica na Formação Chapada Acauã Inferior (Grossi-Sad *et al.* 1997).

A Formação Nova Aurora (Figuras 2 e 3) é composta por metadiamictitos, com intercalações de quartzitos e metapelitos (filitos a xistos micáceos e granatíferos), incluindo o conjunto dominado por metadiamictito ferruginoso e metadiamictito sulfetado, com intercalações de formação ferrífera diamictítica, quartzito e filito hematíticos do Membro Riacho Poções.

Este membro situa-se na porção basal da Formação Nova Aurora, seguido por espesso pacote de metadiamictito não ferruginoso (Vilela 2010). A espessura do Membro Riacho Poções foi estimada em aproximadamente 600m (Viveiros *et al.* 1978; Grossi-Sad *et al.* 1997, Uhlein *et al.* 1999), mas é difícil uma avaliação precisa devido a intensa e complexa deformação regional. Os metadiamictitos da Formação Nova Aurora, incluindo o Membro Riacho Poções, são interpretados como depósitos glácio-marinhos do Criogeniano (Pedrosa-Soares *et al.* 2011).

Na área do distrito são reconhecidos três acervos de estruturas tectônicas, relacionados a três fases de deformação (Uhlein 1991, Mourão *et al.* 1996, Roque *et al.* 1996, Marshak *et al.* 2006, Vilela 2010, Vilela *et al.* 2014). A

primeira fase (D_1), correspondente à principal deformação dúctil regional, se caracteriza pela foliação principal (S_1) de direção NNE e mergulho entre 15° e 50° para ESE. A foliação S_1 é uma xistosidade paralela ao plano axial de dobras apertadas a isoclinais, geralmente transpostas e rompidas, vergentes para oeste. Uma marcante lineação de estiramento de seixos é paralela à lineação mineral contida em S_1 . Os indicadores cinemáticos relacionados às estruturas D_1 indicam transporte tectônico para oeste, rumo ao Cráton do São Francisco. A segunda fase de deformação (D_2) se caracteriza pela foliação S_2 que mergulha em torno de 45° para oeste. S_2 se caracteriza como uma xistosidade ou clivagem de crenulação paralela ao plano axial de dobras assimétricas, em cascata, vergentes para leste. Paralelas a S_2 , ocorrem falhas normais tardias com blocos de capa deslocados rumo a leste. As estruturas e transporte tectônico relacionados à fase de deformação D_2 caracterizam uma larga zona de cisalhamento dúctil-rúptil com movimentação normal, a Zona de Cisalhamento Chapada Acauã, que acomodou deslocamentos associados ao colapso gravitacional do Orógeno Araçuaí (Alkmim *et al.* 2006, Marshak *et al.* 2006). A terceira fase deformacional (D_3) representa a deformação rúptil regional, caracterizada por dois sistemas de fraturas bem espaçadas, direcionados a NW e NE, que se associam às grandes flexuras regionais (Vilela, 2010).

3.3. Depósitos de Ferro da Formação Nova Aurora

Vilela (2010) e Vilela *et al.* (2014) descrevem as rochas, amostradas em afloramentos e testemunhos de sondagem, de áreas prospectadas pela SAM (Sul Americana de Metais S.A.). Nestas áreas, o Membro Riacho Poções é representado por variedades de metadiamictito ferruginoso (a hematita e/ou magnetita). Estas rochas podem atingir teores de ferro acima de 15% (em peso), classificando-se como formação ferrífera diamictítica.

A rocha regional, encaixante das camadas ferruginosas, é um metadiamictito com pequena concentração de ferro total (< 5% em peso).

Os termos intermediários entre a formação ferrífera diamictítica *s.s.* (> 15% Fe) e o metadiamiccito encaixante (< 5% Fe) são também incluídos no Membro Riacho Poções.

3.3.1. Metadiamiccito Encaixante (ou Regional)

Trata-se de um metarrudito suportado pela matriz que ocorre na base e no topo da sucessão litológica portadora de minério de ferro, parecendo ser bem mais espesso no topo. A abundante matriz do metadiamiccito encaixante é cinza-azulada a bege, localmente esverdeada, e envolve clastos mal selecionados em

composição e tamanho. Esta matriz, cuja granulação média varia desde menor que 0,01mm até 0,5mm, é composta por quartzo, muscovita, biotita e/ou clorita, com carbonato e feldspato subordinados.

O quartzo está geralmente recristalizado, com formas poligonais a estiradas segundo a lineação contida em S_1 . Os grãos de quartzo menores foram mais afetados pela deformação e recristalização, mas os maiores podem apresentar características sedimentares preservadas, como formas arredondadas.

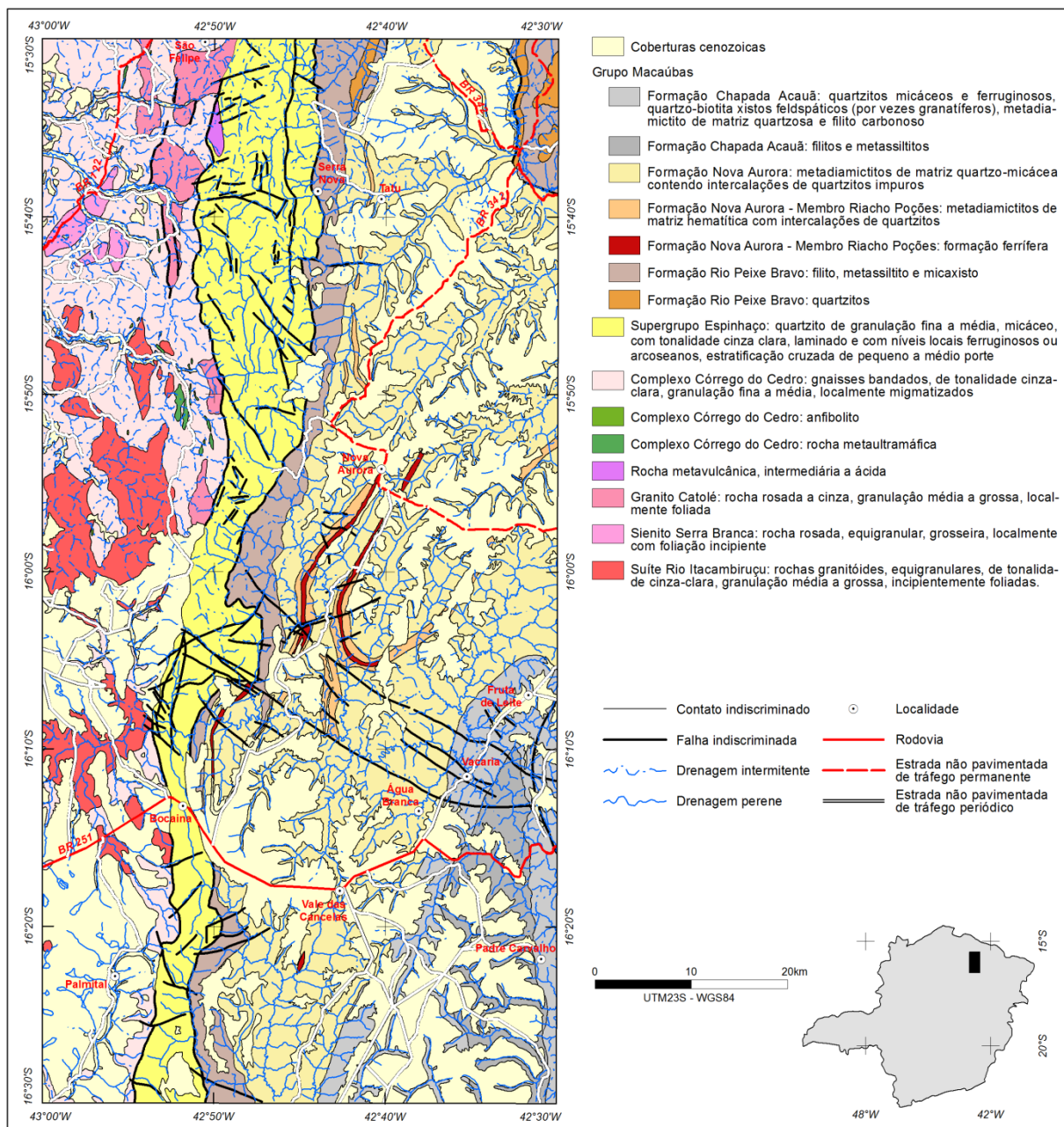


Figura 3. Mapa geológico das folhas Padre Carvalho e Rio Pardo de Minas, do Projeto Espinhaço (modificado de Mourão et al. 1996 e Roque et al. 1996).

Os filossilicatos (muscovita, biotita e clorita) mostram hábitos fibroso a ripiforme, definem as foliações S_1 e S_2 , e envolvem os demais grãos da matriz e os clastos. O carbonato da matriz apresenta formas poligonais ou está orientado segundo a foliação, parecendo ser predominantemente metamórfico. Poucos grãos de carbonato da matriz têm características que podem ser detríticas, embora clastos de carbonato do tamanho de grânulo a seixo são frequentemente encontrados no metadiamicitito. Dentre os feldspatos, o plagioclásio predomina sobre feldspato potássico, sendo ambos detríticos, com formas arredondadas de bordas sinuosas bem preservadas, embora ligeiramente estiradas. A maioria dos grãos de feldspato está significativamente fraturada e alterada por processos como saussuritização e sericitização.

3.3.2. *Litotipos do Membro Riacho Poções*

Esta subunidade da Formação Nova Aurora é caracterizada pela grande abundância de metadiamicitito ferruginoso, ocorrendo amplo espectro de variações composicionais entre os termos hematíticos e magnetíticos (Vilela 2010, Vilela *et al.* 2014). O contato basal do Membro Riacho Poções se caracteriza por zona de cisalhamento dúctil onde ocorrem recristalização e reconcentração de especularita e/ou magnetita. Nesta zona de contato basal, a quantidade de especularita pode alcançar até 60% (em volume) da matriz do metadiamicitito hematítico e aparecem porfiroblastos de magnetita de granulação grossa (> 1mm), geralmente deformados e rotacionados. Da base ao topo, a partir do contato rico em especularita e/ou magnetita, o Membro Riacho Poções caracteriza-se pela predominância de metadiamicitito hematítico com teor de ferro variável, decrescente rumo ao topo (Vilela 2010).

A quantidade de hematita da matriz do metadiamicitito hematítico varia entre 5% e 60%. Hematita e micas ocorrem em concentrações inversamente proporcionais, observando-se em campo a clara diminuição na concentração de hematita rumo ao topo mais enriquecido em mica.

O metadiamicitito hematítico possui trama similar à do metadiamicitito encaixante, mas contém quantidades significativas de hematita em detrimento das micas e outros minerais. A

hematita ocorre disseminada na matriz do metadiamicitito, e se concentra em lâminas, bandas e lentes correspondentes às foliações S_1 e S_2 , mostrando características diferentes em cada caso. Magnetita, parcial a totalmente martitizada, geralmente não passa de 2% em relação ao volume de matriz do metadiamicitito hematítico (à exceção de zonas de cisalhamento onde ocorre enriquecimento em magnetita). A magnetita pode atingir 2cm de diâmetro e ocorre disseminada na matriz ou associada à lâminas e bandas ricas em hematita especular grossa. Os cristais de magnetita podem se mostrar estirados, rotacionados e subgranulados, apresentando caudas de recristalização ricas em hematita especular grossa e sombras de pressão com quartzo e/ou carbonato. Porfiroblastos de magnetita também ocorrem disseminados na matriz. Quando martitizada, a magnetita mostra muitas inclusões de quartzo e outros minerais. O metadiamicitito magnetítico apresenta tonalidade cinza mais escura que o metadiamicitito hematítico e se caracteriza pelo aumento progressivo na quantidade de magnetita em relação à de hematita (que pode estar ausente deste tipo de minério). A magnetita é geralmente porfiroblástica e pode atingir 2mm de diâmetro, predominando granulação maior que 0,7mm. Apesar da deformação da matriz, a magnetita geralmente se apresenta pouco ou nada deformada. Quando deformada, a magnetita orienta-se paralelamente à foliação S_1 que é materializada por quartzo estirado, mica e hematita fina. Porfiroblastos euédricos a subédricos de magnetita com até 1mm de diâmetro, assim como magnetita fina, ocorrem disseminados na matriz. O metadiamicitito magnetítico pode ser bandado, com bandas de cor cinza, ricas em magnetita, intercaladas com bandas mais ricas em quartzo e muscovita. A quantidade de hematita especular aumenta nas bandas ricas em magnetita. Quando mostra tons esverdeados, o metadiamicitito magnetítico apresenta aumento na concentração de clorita e biotita.

Poiquiloblastos de granada ocorrem nas bandas clorítico-biotíticas mais espessas e com menos magnetita. A quantidade de sulfetos (predominantemente pirita) parece aumentar na passagem do metadiamicitito magnetítico para o

metadiamicrito regional que, também, se apresenta sulfetado. Semelhantemente à magnetita, os sulfetos podem estar presentes na forma de porfiroblastos subédricos a euédricos (geralmente cúbicos), com granulação inferior a 1mm, ou estirados e concentrados ao longo da xistosidade S_1 . As rochas do Membro Riacho Poções com teores significativos de ferro são metadiamicritos enriquecidos em hematita e/ou magnetita ao longo de zonas mais deformadas, com destaque para a zona de cisalhamento basal do Membro Riacho Poções, originadas durante as fases de deformação D_1 e D_2 .

Portanto, as formações ferríferas do Membro Riacho Poções são, de fato, rochas metassedimentares detríticas (metadiamicritos) enriquecidas em ferro por processos tectono-metamórficos relacionados à Orogenia Brasileira. A concentração primária de ferro nas camadas diamictíticas parece estar relacionada a processos glaciogênicos, embora não se descarte uma possível contribuição relacionada a vulcanismo (Vilela 2010). Este grande conjunto de depósitos de ferro que conteria mais de vinte bilhões de toneladas de minério de baixo a médio teor, se coloca, portanto, como uma nova fronteira para o setor mineral brasileiro (Vilela *et al.* 2014).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Ferramentas em ambiente SIG (Sistemas de Informações Geográficas) foram utilizadas para processar, integrar e interpretar informações geológicas, aerogeofísicas (gamaespectrometria e magnetometria), modelo digital de terreno e de sensoriamento remoto orbital.

Todos os dados tiveram os parâmetros cartográficos uniformizados e é utilizada a Projeção Universal Transversa de Mercator, Fuso 23S e *datum* horizontal WGS84.

O processamento foi feito com o objetivo de realçar os contrastes existentes entre os alvos, separando os corpos ricos em ferro, aflorantes ou não.

4.1. Mapas geológicos

Os mapas geológicos utilizados foram as folhas Padre Carvalho (Mourão *et al.* 1996) e Rio Pardo de Minas (Roque *et al.* 1996) do Projeto Espinhaço (Figura 3), produzidos originalmente em escala 1:100.000 e já transformados, pela

equipe coordenada pela autora, em formato SIG (ArcGIS®) no Laboratório de Mapeamento Geológico Digital (MGD) do Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC-UFMG). Além destes, foram utilizados os mapas geológicos de maior detalhe apresentados em Vilela (2010, escala original 1:10.000) e pela Sul Americana de Metais S.A. (2013, escala original 1:15.000), no estudo de caso aqui elaborado.

4.2. Levantamento aerogeofísico: magnetometria e gamaespectrometria

Os dados de aerogeofísica utilizados são aqueles da Área 8 (Minas Novas-Riacho dos Machados-Espinosa) do Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (CODEMIG-SEDE-CPRM 2006). Este levantamento aerogeofísico constou do recobrimento de 87.212,45km de perfis aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos de alta resolução, com linhas de voo e controle espaçadas de 0,5km e 10,0km, orientadas nas direções N25W e N65E, respectivamente. O intervalo entre medições geofísicas consecutivas foi de 0,1s (magnetômetro) e 1,0s (espectrômetro). A altura média de voo foi de 100m e a velocidade aproximada de 280km/h. Os dados magnetométricos foram disponibilizados parcialmente processados, pela aplicação das correções de erro de paralaxe, remoção da variação magnética diurna, nivelamento dos perfis, micronivelamento dos perfis e remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF). Aos dados gamaespectrométricos são aplicadas, antes de disponibilizados, a correção de tempo morto, aplicação de filtragem, o cálculo da altura efetiva de voo, remoção do *background* da aeronave e cósmico, remoção do *background* do radônio, estimativa dos coeficientes *skyshine*, correção do efeito Compton e correção altimétrica. A correção do erro de paralaxe não foi aplicada, já que não foi observado o erro nos dados radiométricos (CODEMIG-SEDE-CPRM 2006).

4.2.1. Processamento dos dados geofísicos magnetométricos

Os dados magnetométricos são resultantes da medição de variações na intensidade do campo

magnético da Terra, causadas pela distribuição das rochas magnetizadas em subsuperfície.

É possível avaliar as condições geológicas locais através de contrastes do valor do campo magnético local. Esses contrastes podem ser causados devido a diferenças litológicas e outras heterogeneidades existentes no subsolo.

Descreve-se, no item adiante, a sequência de processamentos que foram executados para se gerar os dados aerogeofísicos utilizados na elaboração dos modelos prospectivos.

4.2.1.1. Testes de consistência

Com os dados micronivelados foram efetuados testes de consistência para se localizar e eliminar problemas relativos a posicionamento de linhas de voo (cruzamento de linhas) ou a ruídos (*spikes*) gerados na aquisição dos dados. Depois desta etapa inicial, foram calculadas a diferença quarta e parâmetro P (Blum 1999). Após esta fase, que mostrou que os dados estavam consistentes e com boa qualidade, passou-se à geração de produtos finais. Para a interpolação dos dados foi definida a resolução espacial de 125m, que corresponde a 1/4 da distância entre as linhas de voo, estabelecida em 500m.

4.2.1.2. Campo magnético anômalo (CMA)

Com os valores de Campo Magnético Total Micronivelado Reduzido do IGRF foi gerada a imagem que representa o campo magnético anômalo (CMA, (Figura 4). O CMA, além de básico para geração de outros produtos, auxilia na interpretação da estruturação geral da área em estudo (Sordi, 2007). No caso focado, a imagem de CMA mostra, grosseiramente, o *trend* estrutural NNE e os dobramentos das formações ferríferas diamictíticas aflorantes, sugerindo sua continuidade abaixo das extensas chapadas (comparar Figuras 3 e 4).

4.2.1.3. Espectro radial de potência

O espectro radial de potência, calculado a partir do campo magnético anômalo, mostra a média da energia proveniente de todas as direções correspondentes a um número de onda. A análise do espectro radial é um recurso qualitativo para determinar as profundidades das fontes magnéticas, que são interpretadas pelos domínios de frequência. Essa metodologia não é recomendada para se estimar quantitativamente a profundidade, uma vez que

esta é deduzida pela média estimada em relação a um comprimento de onda (Gunn 1997).

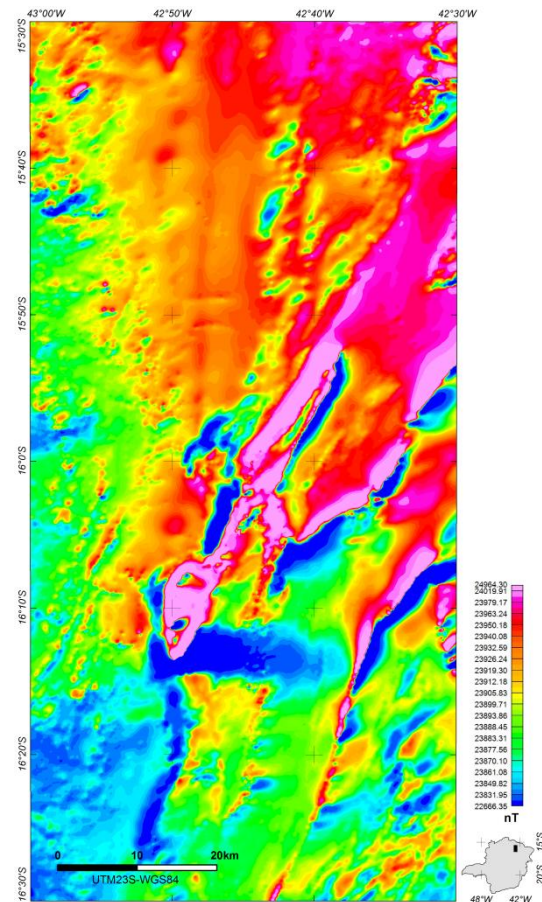


Figura 4. Campo magnético anômalo (CMA) gerado para a área de estudo.

No diagrama do espectro radial, as profundidades dos topos das fontes magnéticas são estimadas pelas quebras nas declividades das curvas do espectro de potência. A mudança de gradiente também corresponde à mudança de comprimento de onda, o que pode caracterizar, conseqüentemente, funções geológicas distintas, pois representam fontes magnéticas distintas (Buffon & Strieder 2005).

A observação de diferentes gradientes no diagrama do espectro radial determinou quatro grupos de fontes magnéticas distintas para a região do estudo (Figura 5):

profundidades muito rasas, de até 0,5km e comprimento de onda entre 0,5 e 0,85km,

fontes rasas, entre 0,5 e 0,8km com comprimento de onda entre 0,8 e 2,2km,

fontes intermediárias, com profundidade entre 0,8 e 1,3km, e comprimentos de onda entre 2,2 e 15km.

fontes profundas, acima de 1,3km, e comprimento de onda superior a 15km.

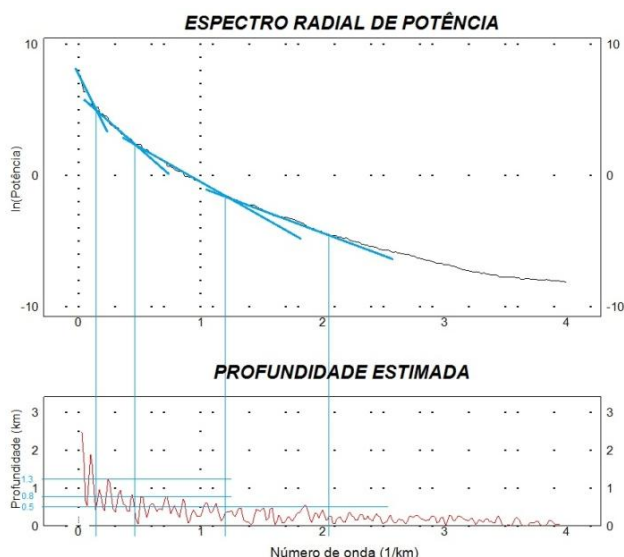


Figura 5. Espectro radial de potência para a região estudada.

4.2.1.4. Derivadas horizontais e vertical

As derivadas horizontais e vertical medem a taxa de variação do campo magnético anômalo em relação à distância da fonte (Maas *et al.* 2003). Essa técnica realça as altas frequências. Seus produtos são utilizados para delimitar e localizar melhor o centro dos corpos após a redução ao polo, além dos limites e estruturas causadoras das anomalias (Figura 6). As derivadas geradas serviram ao traçado dos lineamentos magnéticos e sua integração com outros produtos, como adiante descrito.

4.2.1.5. Amplitude do sinal analítico (ASA)

A amplitude do sinal analítico é calculada a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas do campo magnético anômalo (Figura 7). Apresenta assinatura localizada das fontes magnéticas e, portanto, realça as bordas em corpos largos e o centro em corpos estreitos, independentemente das direções magnéticas da fonte ou do campo magnético da Terra (Blum 1999). Sobre a imagem ASA delimitaram-se os domínios magnéticos da região estudada, conforme adiante descrito.

4.2.1.6. Domínios magnéticos

São sete (D1 a D7) os domínios magnéticos delimitados sobre a imagem de amplitude de sinal analítico (Figura 7). Estes domínios foram delimitados levando-se em conta a intensidade do sinal e a textura da imagem. O domínio D1 registra sinal mais forte e textura mais rugosa. O domínio D7 mostra menor intensidade de sinal e textura mais uniforme.

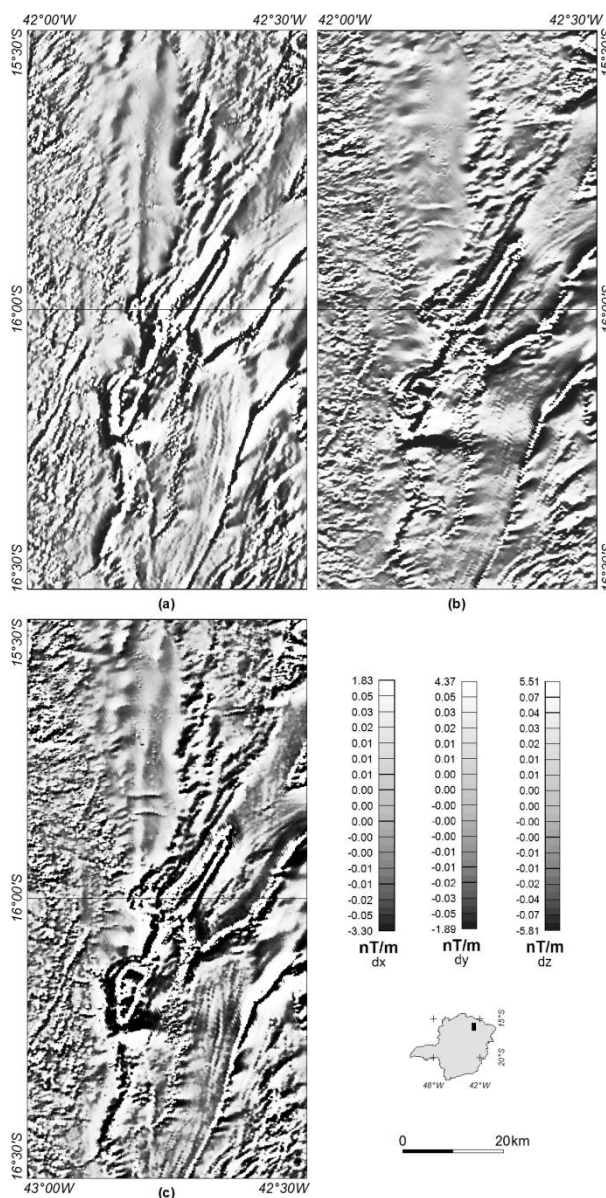


Figura 6. Derivadas horizontais (a) e (b) e vertical (c) para a região de estudo.

Os demais domínios indicam situações intermediárias entre D1 e D7. A Figura 8 apresenta a imagem da amplitude de sinal analítico em dimensão 2,5 (tendo a intensidade de sinal como valor de cota), associada aos limites dos domínios magnéticos identificados. A comparação dos domínios magnéticos com as unidades do mapa geológico é dificultada pelas extensas coberturas de chapadas (Figuras 3 e 7), mas pode-se destacar algumas correlações com segurança: i) o domínio D1 principal, que delinea uma grande dobra situada na porção central da área, coincide com as formações ferríferas mais aflorantes do Membro Riacho Poções, anteriormente mapeadas (Figura 3), e sugere continuidade dessa unidade em sub-superfície; ii) o domínio D1 menor, situado a sudeste, coincide com a parte externa da dobra

da Formação Chapada Acauã, onde ocorre muito quartzito ferruginoso, mas, ao menos em superfície, muito rara formação ferrífera (comparar Figura 3 e 7). Como é de se esperar, os domínios 1, 2 e 3 correspondem às maiores concentrações de processos ativos para pesquisa e lavra de minério de ferro, cadastrados no DNPM.

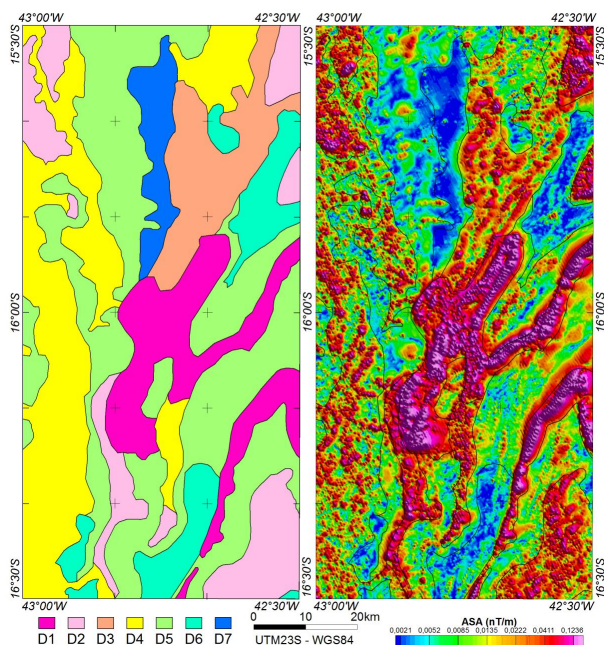


Figura 7. Domínios magnéticos interpretados para a área de estudo: à esquerda, domínios magnéticos; à direita, limites dos domínios magnéticos sobre a imagem ASA.

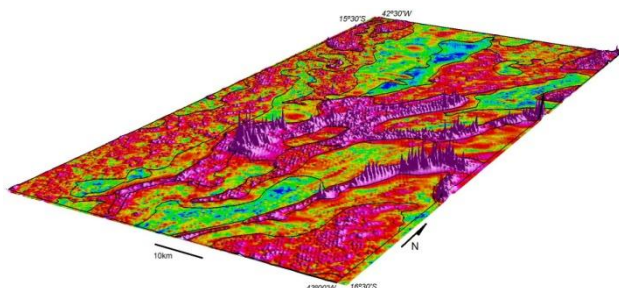


Figura 8. Amplitude do sinal analítico simbolizada em dimensão 2,5 (intensidade de sinal como valor de Z), associada aos limites dos domínios magnéticos.

4.2.1.7. Lineamentos magnéticos

Os lineamentos magnéticos foram traçados sobre as imagens criadas a partir do cálculo das primeiras derivadas em relação a X, Y e Z. Esta interpretação pode auxiliar na localização do centro dos corpos após a redução ao polo, além dos limites e estruturas causadoras das anomalias. Além disso, pode fornecer informações sobre os contatos, discontinuidades e lineamentos (Sordi 2007). Observa-se, como feição mais destacada na região, a predominância dos lineamentos NE

em contraste com as outras direções encontradas (Figura 9).

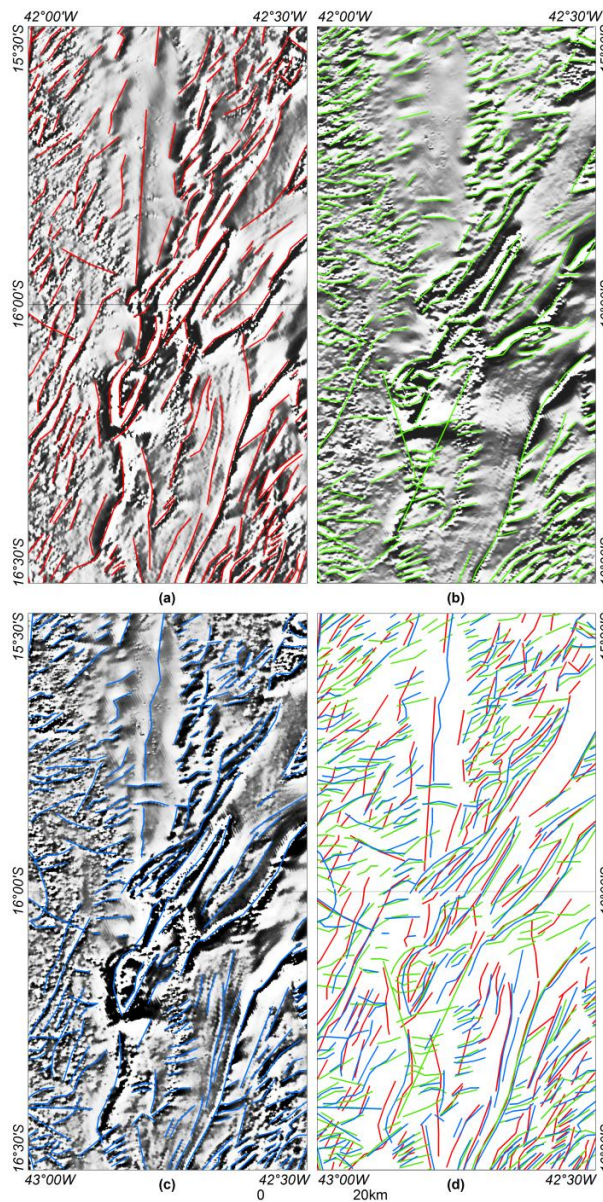


Figura 9. Lineamentos magnéticos na área de estudo, interpretados sobre a derivada em X (a), Y (b), e Z (c), e mostrando as interpretações sobre as três direções (d: em vermelho sobre dx, em verde sobre dy e em azul sobre dz).

4.2.1.8. Deconvolução de Euler

O algoritmo de Deconvolução de Euler 3D foi desenvolvido para se estimar a profundidade de fontes e corpos magnéticos (Thompson 1982).

Este processo relaciona o campo magnético à localização da fonte da anomalia, com o grau de homogeneidade N que é expresso como "índice estrutural".

Neste trabalho foi executado o algoritmo sobre a área de maior concentração de anomalias magnéticas (Figura 10).

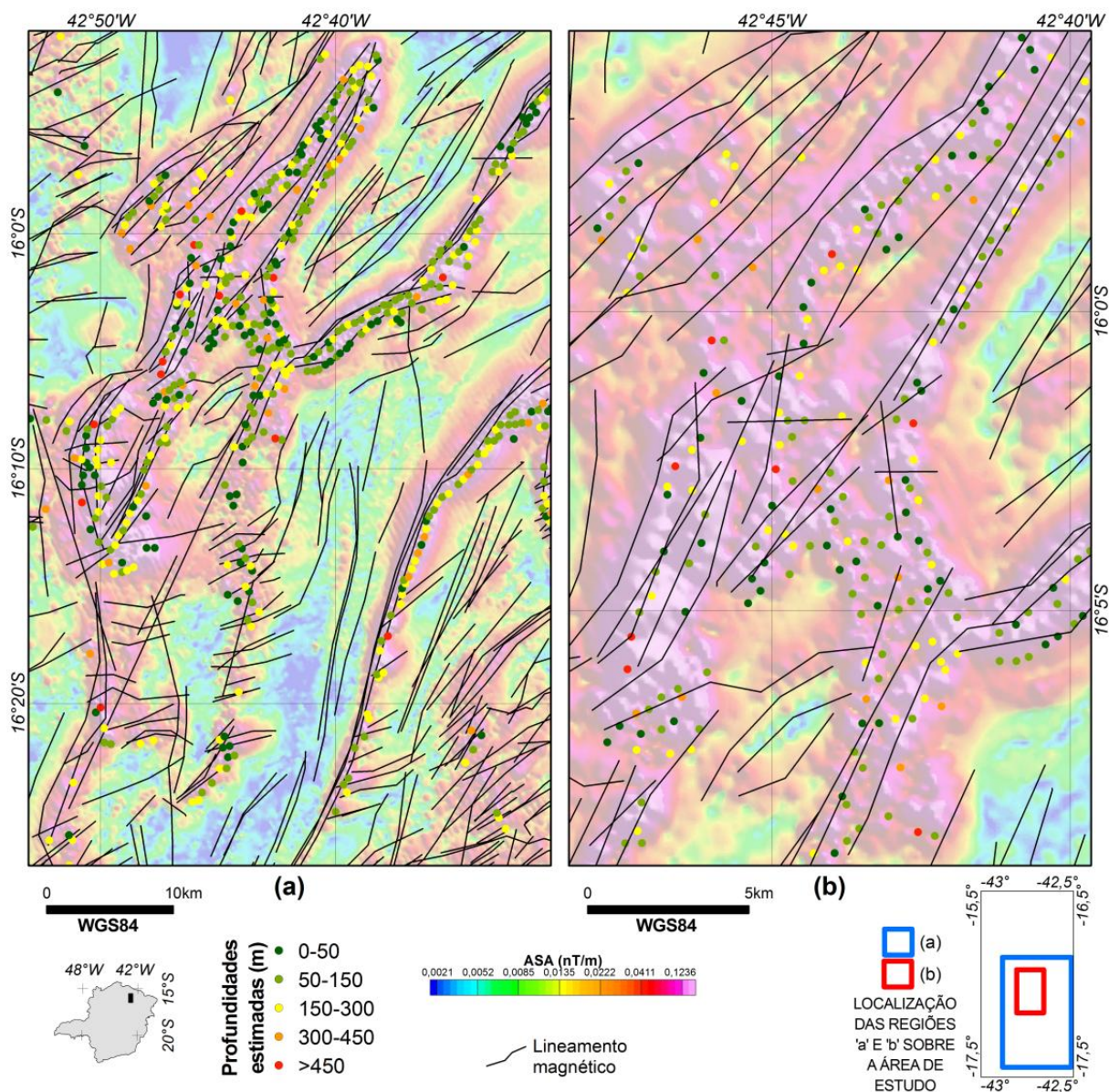


Figura 10. Resultado do processamento da Deconvolução de Euler, mostrando soluções e as profundidades estimadas das fontes magnéticas para a áreas de detalhe 'a' e 'b', sobrepostas pelos lineamentos magnéticos interpretados.

Utilizou-se o índice estrutural $N=1$, correspondente a corpo planar de duas dimensões, que é o tipo de geometria previsível para a área. O resultado deste processamento estimou profundidades para as fontes magnéticas entre 0 e 2,5km, sendo que cerca de 77% das soluções indicam profundidade de até 500m.

Comparando-se com os quatro grupos de fontes magnéticas interpretados no gráfico de Espectro Radial de Potência e suas profundidades (Figura 5), obteve-se cerca de 77% das fontes magnéticas em profundidades de até 0,5km, 17,5% entre 0,5 e 0,8km, 5% entre 0,8 e 1,3km e somente 0,5% em profundidades superiores a 1,3km. Pode-se observar que os pontos gerados pelas soluções encontradas na Deconvolução de

Euler se alinham segundo as direções interpretadas dos lineamentos (Figura 10).

4.2.2. Processamento dos dados geofísicos gamaespectrométricos

A utilização dos dados gamaespectrométricos considera o baixo conteúdo geral de isótopos radioativos nessas formações, além da possibilidade de se realçar alvos mascarados pelo intemperismo por meio de mapas de razões entre os três canais.

Assim como se fez com os dados magnetométricos, realizaram-se testes de consistência para o acervo de dados gamaespectrométricos, visando localizar e eliminar problemas relativos a ruídos gerados na aquisição dos dados.

Depois desta etapa inicial, foram geradas as imagens de contagem total (CT) e dos canais individuais para potássio (K), tório (eTh) e urânio (eU). Além disso, foram geradas imagens com as razões U/K, K/Th e Th/K, e as composições ternárias (RGB) a partir dos canais individuais e do canal do potássio e razões Th/K e U/K.

4.2.2.1. Composição ternária e domínios gamaespectrométricos

A composição ternária permite que se avalie a contribuição proporcional de cada elemento, visando diferenciar domínios gamaespectrométricos (Figura 11c). A partir de interpretação visual e por classificação supervisionada, foram individualizados treze domínios (Figura 11a e b). As assinaturas geofísicas dos dados gamaespectrométricos são, ao contrário das assinaturas magnetométricas, mais facilmente correlacionáveis com as unidades geológicas mapeadas (comparar Figuras 3, 7 e 11).

O embasamento granito-gnáissico, arqueano a paleoproterozoico, aflora na porção oeste da área. É composto predominantemente por gnaisses tonalíticos a graníticos. Os domínios 5 (altos eU e %K, baixo eTh), 6 (altos %K, eTh e eU), 7 (altos %K, eTh e eU, intercalados com altos %K e eU, baixo eTh) e 8 (altos eTh, e eU intercalados com altos %K e eU) correlacionam-se com as unidades do embasamento (Figura 11a). Estas assinaturas, mostrando altos valores para os três elementos, são típicas de rochas graníticas.

O domínio 13 (baixos %K, eTh, e eU) é correlacionável com o Supergrupo Espinhaço, onde predominam quartzitos que são rochas pobres nestes elementos (Figura 11a).

O Grupo Macaúbas, predominante na porção leste na área, consiste de metadiamicictito, formação ferrífera diamictítica, quartzitos puro, micáceo ou ferruginoso, e metapelitos micáceo, carbonoso ou ferruginoso. Esta diversidade litológica se reflete na má definição da assinatura gamaespectrométrica.

Visualmente, diferencia-se os domínios 3 (altos %K e eTh, baixo eU), 5 (altos eU e %K, baixo eTh), 10 (médios a baixos %K e eTh, baixo eU), 9 (médios %K e eTh, com concentrações um pouco acima das do domínio 10, baixo eU)

e 11 (médios %K, eTh e eU). Os domínios 9 e 11 correlacionam-se com a Formação Chapada Acauã (Figura 11a). No mapa gerado por classificação supervisionada, observa-se que os domínios aparecem de forma muito mais granulada, resultado da diversidade litológica do Grupo Macaúbas (Figura 11b).

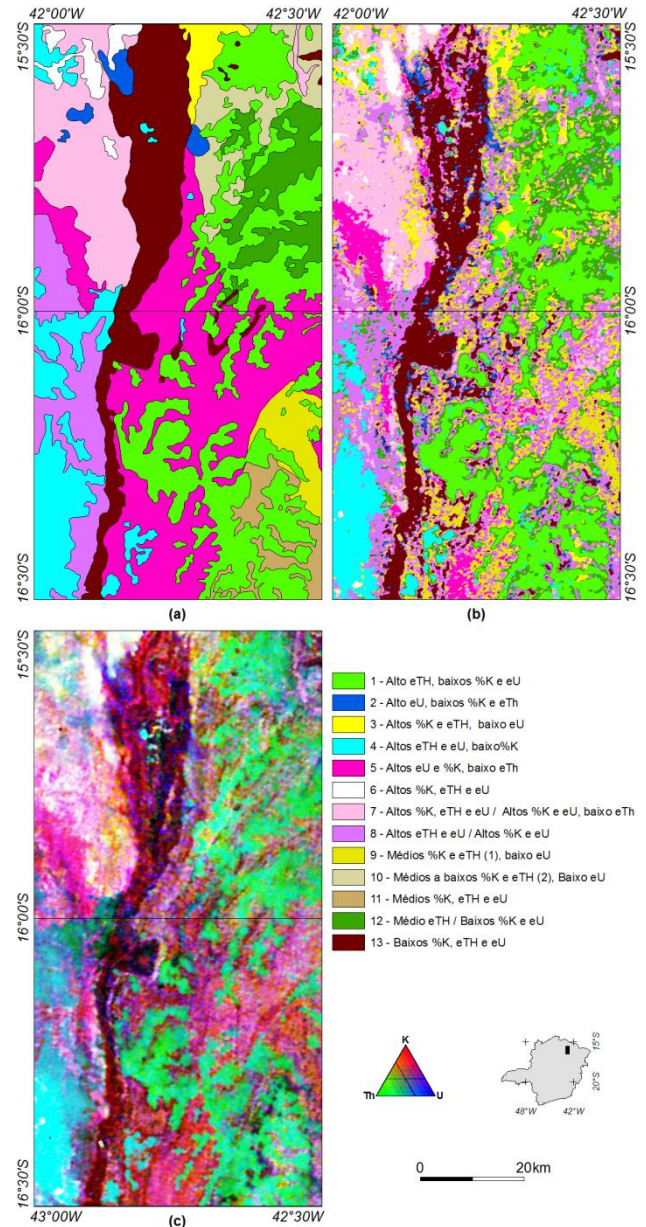


Figura 11. Domínios gamaespectrométricos da área de estudo: a) interpretação visual, b) classificação supervisionada, c) composição ternária.

Na porção central e centro-sul da área ocorrem manchas correspondentes ao domínio 13 (baixos %K, eTh e eU), as quais corresponderiam a rochas ricas em ferro (normalmente pobres em K, Th e U). As coberturas mostram as assinaturas gamaespectrométricas mais marcantes na região. São representadas pelos domínios 1 (alto

eTh, baixos %K e eU) e 4 (altos eTh e eU, baixo%K -Figura 11a).

As assinaturas das coberturas são diferentes nas partes oeste e leste da região. A oeste, onde ocorrem o embasamento gnáissico e o Supergrupo Espinhaço, observa-se concentração maior de urânio. Na porção leste, as coberturas sobre as rochas do Grupo Macaúbas são mais ricas em tório (Figura 11c).

O domínio 12 (médio eTh, baixos %K e eU; (Figura 11a), que ocorre na porção nordeste da área, se caracteriza por maior concentração de tório em relação a urânio, mas em razão relativamente menor que as coberturas mais altas da região. Interpreta-se que este domínio se refere a coberturas mais baixas, onde dissecação e lixiviação já estão mais avançadas, mas ainda não foi suficiente para retirar todo o tório. No mapa de classificação supervisionada, o domínio 12 (médio eTh) bordejia o domínio 1 (alto eTh), correspondendo às bordas das coberturas de chapadas (Figura 11b).

4.2.2.2. Razões gamaespectrométricas

Na maior parte das condições de intemperismo, o potássio é o mais móvel dos três elementos medidos na gamaespectrometria. Urânio e tório tendem a ser adsorvidos em argilo-minerais e precipitados com óxidos de ferro nos solos (Wilford *et al.* 1997). Assim, o urânio tende a se concentrar em porções mais superficiais do solo, ao passo que lateritas podem conter altos teores de tório (Boyle 1982).

As variações nas concentrações dos isótopos radioativos podem ser realçadas através da aplicação de razões entre os canais do K, Th e U. No caso das formações ferríferas, a razão entre eTh/K realça concentrações anômalas de tório, relacionadas às chapadas extensivamente cobertas de lateritas.

A razão eU/K destaca solos elúvio-coluvionares (Figura 12a e b). A composição ternária mostra as diferentes proporções destes elementos na superfície (Figura 12c). A combinação dessas razões com o canal do K em uma composição ternária permite separar essas coberturas em relação às unidades metassedimentares clásticas e rochas do embasamento (Figura 13d).

4.3. Imagem de satélite Landsat 8

As imagens *Landsat 8 Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor*

(TIRS) consistem de nove bandas espectrais com resolução espacial de 30m (bandas 1 a 7 e 9), 15m (banda 8, pancromática) e 100m (bandas 10 e 11, termais). Cada cena tem o tamanho aproximado de 170km (N-S) por 183km (EW). As imagens já são fornecidas ortorretificadas (USGS, 2013), com precisão cartográfica de 12m, 90% de confiança (OLI, 41m) e 90% de confiança (TIRS).

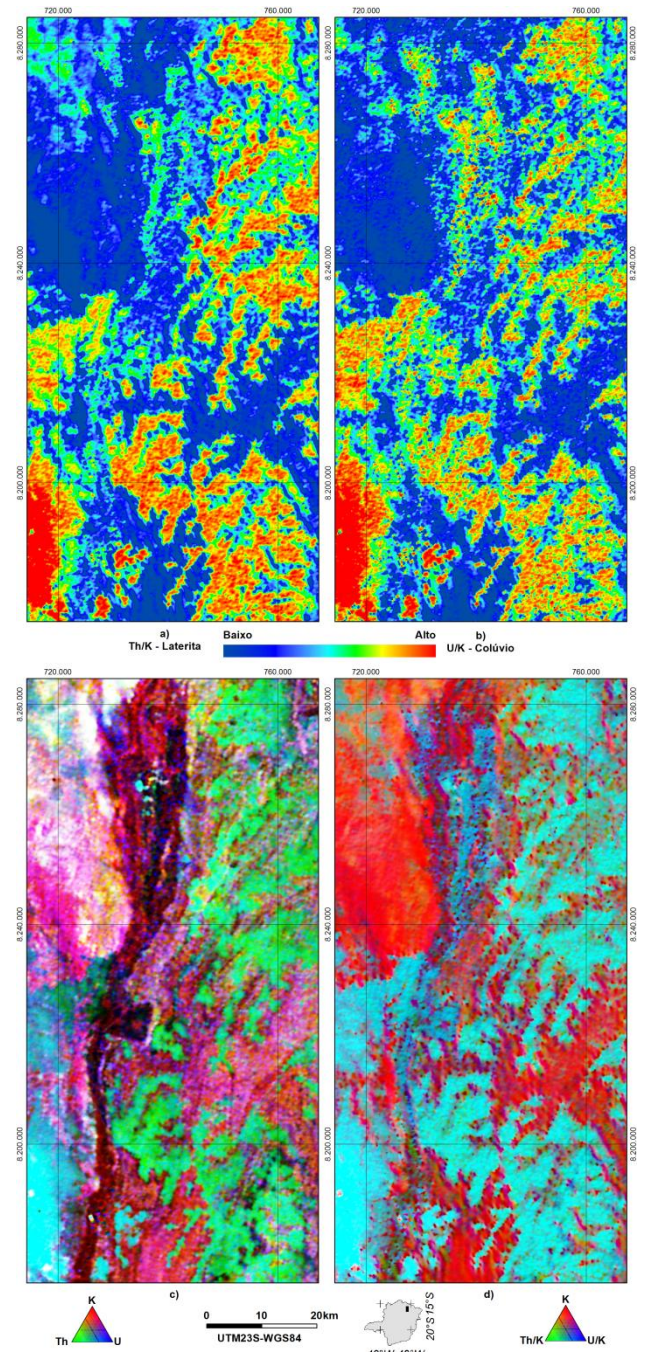


Figura 12. Resultado do cálculo das razões entre os canais de (a) Th e K, (b) U e K, e (c) composição ternária dos canais de K, Th e U, e (d) composição ternária a partir do canal de K e razões entre os canais de Th e K, e de U e K.

Gerou-se uma série de produtos a partir de técnicas de processamento digital de imagem, como análise por componentes principais,

operações aritméticas (razões de banda) e composições coloridas. Os resultados dos processamentos foram analisados e interpretados em relação à capacidade de discriminação de áreas com elevadas concentrações de ferro.

Neste trabalho foram utilizadas as cenas 217-71 (aquisição em 1/7/2013) e 218-71 (aquisição em 21/5/2013), escolhidas em função da época do ano e ausência de cobertura de nuvens. Estas imagens foram mosaicadas e recortadas segundo a área de interesse (Figura 13).

A resolução espectral deste sensor foi determinante para sua escolha, já que os íons de ferro têm importantes propriedades de absorção ao longo do espectro eletromagnético, as quais coincidem com os intervalos espectrais das bandas do sensor. O objetivo foi realçar as regiões que possuem maior concentração do óxido de ferro em superfície, analisando os espectros eletromagnéticos da hematita, campo seco e vegetação densa, em relação às bandas espectrais do satélite Landsat (Figura 14).

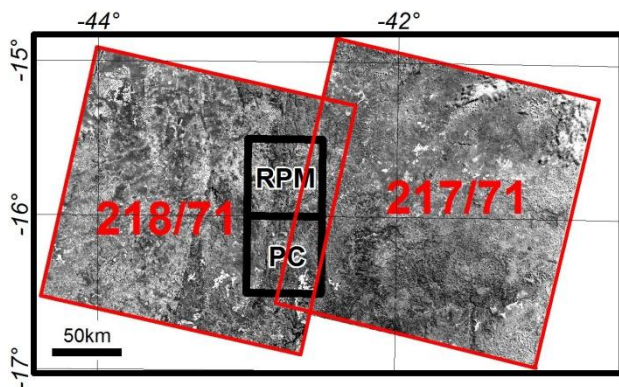


Figura 13 - Imagens Landsat 8 sobre a área de estudo (218/71 e 217/71, banda 4). RPM, Folha Rio Pardo de Minas, PC, Folha Padre Carvalho).

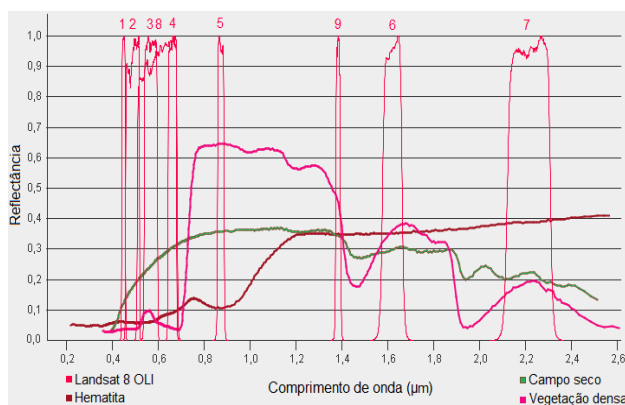


Figura 14. Posições das bandas do Landsat 8 no espectro eletromagnético, em relação às curvas espectrais da hematita, campo seco e vegetação densa (USGS, 2013).

4.3.1. Análise por Componentes Principais

Uma técnica utilizada para se combinar bandas espectrais, realçando os contrastes, é a análise por componentes principais (APC). Este método é utilizado para analisar os dados eliminando redundâncias e tornando possível a escolha de suas formas mais representativas por meio de combinações lineares das variáveis originais. Por APC se faz a transformação de variáveis discretas em coeficientes sem correlação. É uma transformação matemática que gera novas imagens que são combinações lineares das imagens originais.

Chavez & Kwarteng (1989) propõem a utilização da técnica *Selective Principal Component Analysis* que utiliza apenas um par de imagens, escolhidas a partir da matriz de correlação entre as bandas e do comportamento espectral do alvo procurado.

Quando o interesse é realçar uma informação que é única em uma banda espectral, o objetivo é simplificar as imagens, eliminando as informações redundantes e isolando a informação desejada. Neste caso, se utiliza como entrada um par de imagens com correlação média (0,7 a 0,98) a baixa (<0,7), e o segundo componente gerado é o que se adota.

O primeiro componente terá a informação que é comum às duas imagens (como sombreamento topográfico ou albedo), enquanto que o segundo componente conterà as diferenças ou contrastes entre as duas imagens. Para se realçar óxidos e hidróxidos de ferro aplicou-se a APC para as bandas 2 e 4. Para se mapear superfícies ricas em argilo-minerais foi feita a APC para as bandas 6 e 7 (Zacchi *et al.* 2010). Em ambos os casos foi utilizado o segundo componente que traz a informação mais contrastante (Figura 15a, b).

4.3.2. Índice para realce de hematita

Zacchi *et al.* (2010) sugerem o cálculo do índice para realce de hematita em solo, utilizando as bandas visíveis do sensor, como:

$$IH = \frac{(B4)^2}{(B2)^3 \times (B7)}$$

Onde IH= índice para realce de hematita;

B2, B3, B4 = bandas 2, 3, 4 (do sensor Landsat 8)

A Figura 15c mostra o índice de realce para hematita nos solos da área de estudo.

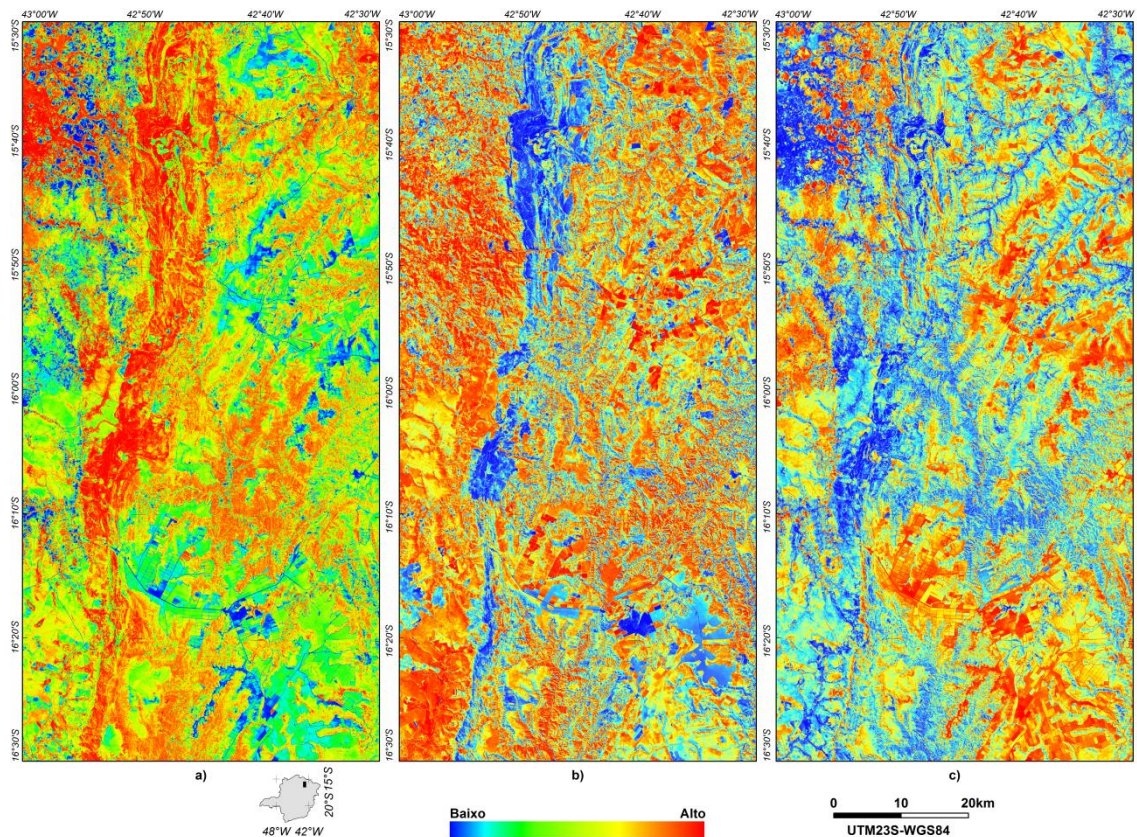


Figura 15. Análise por componente principal seletiva para realce de (a) óxido-hidróxido de ferro, (b) argilo-minerais e (c) índice de teor de hematita em solo.

4.4. Modelo digital de terreno: SRTM

A missão espacial SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), um projeto internacional liderado pela Agência Nacional de Inteligência Geoespacial e NASA (EUA), tem produzido a mais completa base de dados topográficos de alta resolução da Terra. Os dados, processados pela NASA, têm resolução espacial de 90m e estão disponíveis no EROS Data Center (USGS 2004).

No presente trabalho, utilizou-se o modelo digital de terreno, juntamente com o relevo sombreado, para análise da configuração geomorfológica da região (Figura 1).

4.5. Modelagem espacial

4.5.1. Modelos guiados pelo conhecimento

Foram combinados dados espaciais para reduzir a ambiguidade nas interpretações que, normalmente, aparecem quando se analisa os dados de forma individual.

A seleção de áreas potenciais foi feita com o desenvolvimento de um modelo baseado em conhecimento prévio (Câmara *et al.* 2001). Neste caso, se dispõe de um conjunto de informações de entrada que permite a

delimitação de áreas, as quais satisfazem critérios pré-definidos de acordo com a caracterização do minério.

O modelo *booleano* envolve a combinação lógica de mapas binários que possuem, cada um, informação utilizável como condição para que a hipótese levantada seja satisfeita. Como exemplo, a hipótese de que a área é ou não favorável à prospecção de minério de ferro, sendo atribuídos os valores 1 ou 0 para cada classe, respectivamente.

O conjunto de mapas é combinado de forma a gerar resultado expresso na forma binária (0, hipótese não satisfeita; 1, hipótese satisfeita).

Por sua vez, no modelo de lógica *Fuzzy* os mapas são organizados conforme grau de pertinência, contínuo e crescente entre 0 e 1. O resultado é um mapa cujos valores variam entre 0 e 1 (quanto mais próximo de 1, maior favorabilidade para o fenômeno estudado). Trata-se de modelo de caracterização de classes, adequado quando não se pode definir limites rígidos entre as classes de dados (Câmara *et al.* 2001).

4.5.2. Modelagem dos dados

Os dados geofísicos e de sensoriamento remoto foram reclassificados e combinados utilizando-se operadores de lógica *Fuzzy* (Figura 16). Os passos adotados para a análise por lógica *Fuzzy* são os seguintes:

1. Definição do problema: definição de áreas favoráveis à prospecção de minério de ferro na região de interesse.
2. Subdivisão dos dados em sub-modelos: descrito nos itens 5.1 a 5.2 (geração de produtos derivados dos dados de geofísica, e imagens Landsat 8 e SRTM).
3. Determinação dos níveis significantes de informação: os produtos mais significantes para a análise são as imagens de amplitude do sinal analítico; imagens das razões Th/K, U/K, e composição ternária (K-Th-U); imagens com o cálculo do índice de realce de hematita em solo (IH); análise de componente principal seletiva para realce de

óxido-hidróxido de ferro (APC-Fe), e de argilo-minerais (APC-arg).

4. Reclassificação ou transformação do dado em cada nível de informação: ver adiante.
5. Adição ou combinação dos níveis de informação: ver adiante.
6. Análise e interpretação dos resultados.

Para utilização da lógica *Fuzzy*, cada dado selecionado foi reclassificado, transformando-se sua faixa de valores em intervalo de 0 a 1 (0, menor favorabilidade e 1, favorabilidade máxima). Para este fim, foram utilizadas as funções *Fuzzy Large* e *Small*.

A função de transformação *Large* é utilizada quando os valores mais altos em cada dado correspondem à maior favorabilidade do fenômeno estudado. Caso contrário, quando os valores mais baixos em cada dado correspondem à maior favorabilidade, utiliza-se a função *Small*. O operador *Large* foi aplicado às imagens de ASA, Th/K, U/K, IH e APC-Fe.

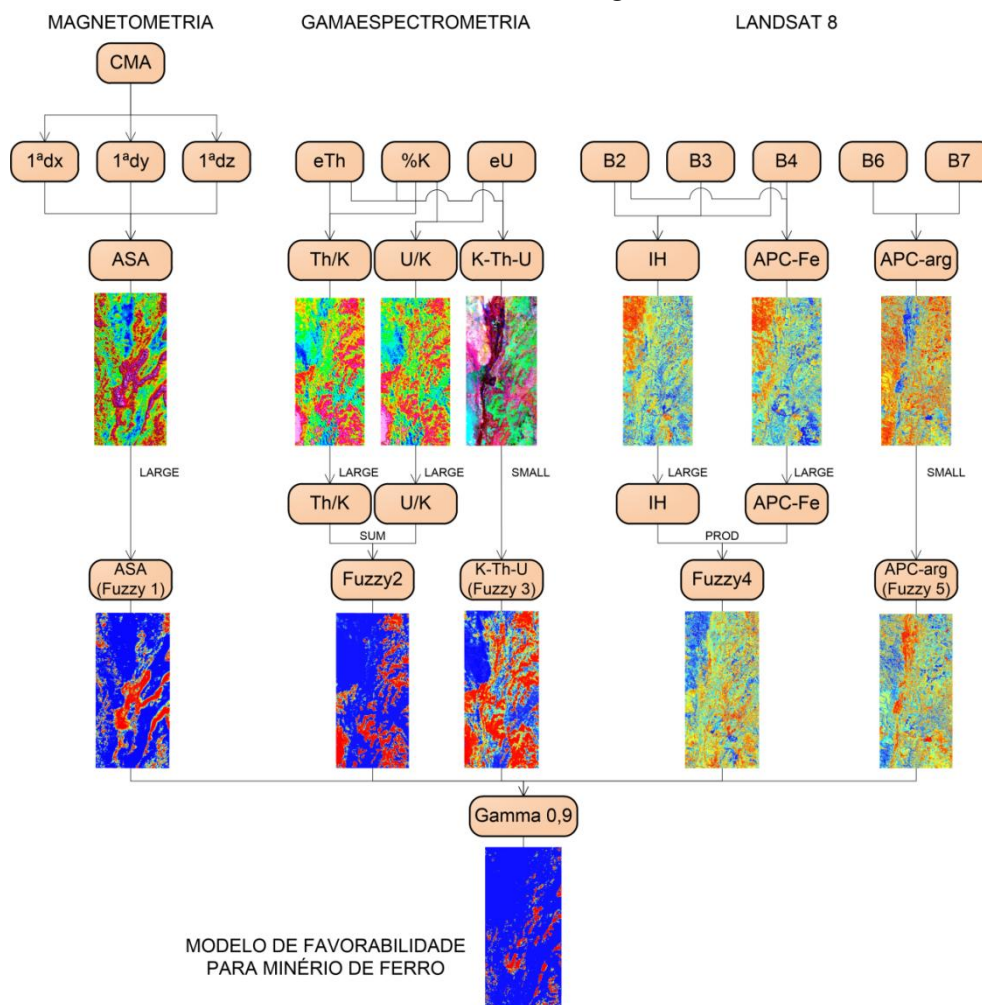


Figura 16. Fluxograma de processo para análise visando geração de modelo prospectivo para minério de ferro, baseado em modelo guiado pelo conhecimento utilizando-se lógica *Fuzzy*.

À composição ternária K-Th-U e à APC-arg aplicou-se o operador *Fuzzy Small*. As imagens reclassificadas IH e APC-Fe foram combinadas, utilizando-se o produto algébrico *Fuzzy* (Bonham-Carter 1994) (Figura 16). As imagens reclassificadas de Th/K e U/K foram combinadas, utilizando-se a soma algébrica *Fuzzy* (Bonham-Carter 1994). Finalmente, as imagens resultantes foram combinadas, utilizando-se o operador *Fuzzy gama* (Bonham-Carter 1994). O índice de importância γ (gamma), variável entre 0 e 1, define a

importância de cada membro do operador. No caso, os dados foram modelados de forma que maiores valores reflitam maior favorabilidade para a ocorrência de minério de ferro.

Assim, depois de uma sucessão de testes, definiu-se que γ (gamma) = 0,9, que atribui maior importância ao termo "soma algébrica *Fuzzy*", evidenciando os maiores valores dos dados (Figura 16).

A imagem resultante deste operador é o mapa de favorabilidade para minério de ferro na área de estudo (Figura 17).

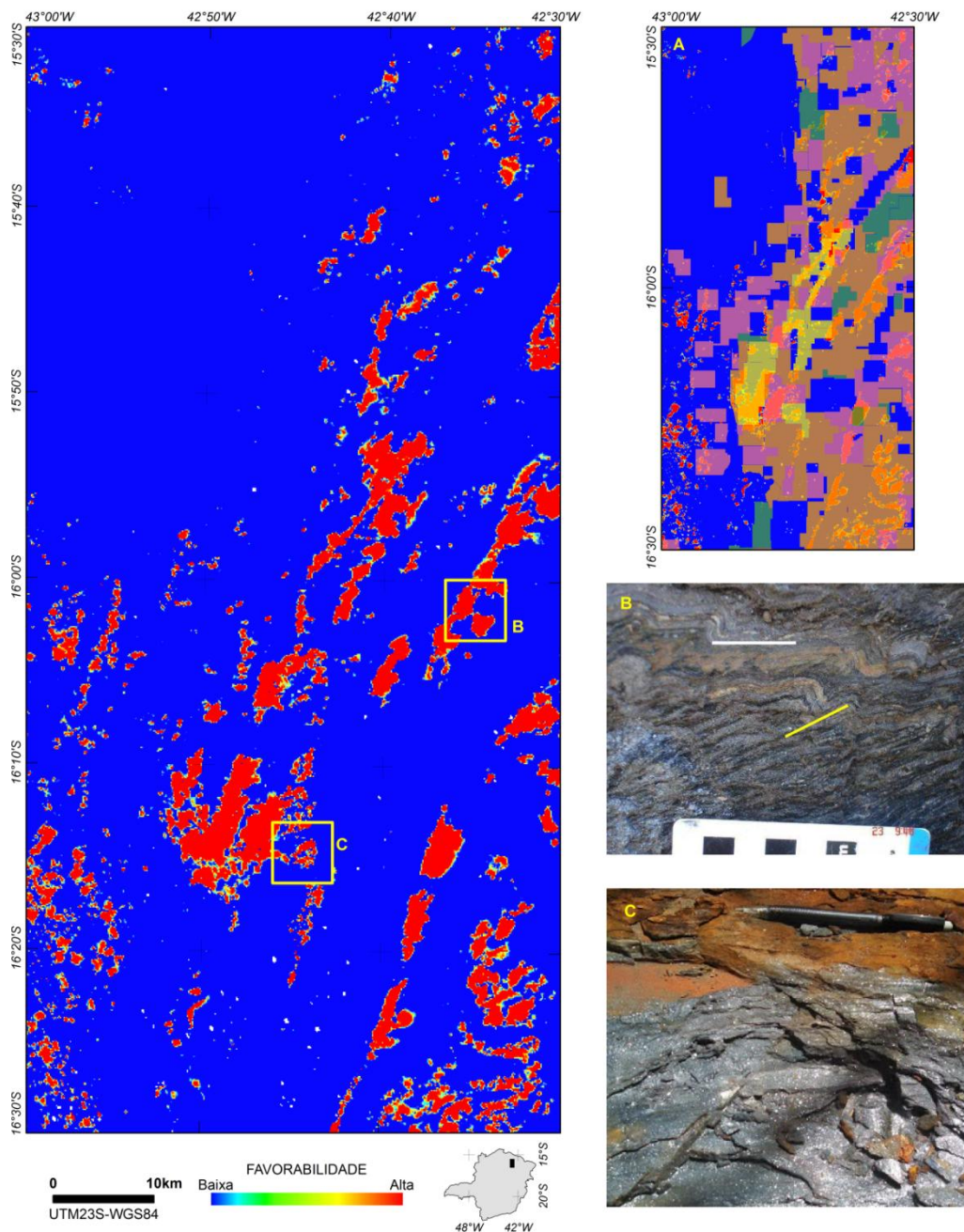


Figura 17. Modelo prospectivo regional para minério de ferro (mapa maior, à esquerda), mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção (em vermelho). A) Mapa com a localização dos requerimentos de lavra (amarelo), autorizações de pesquisa (laranja), requerimentos de pesquisa (verde) e áreas em disponibilidade (rosa) para minério de ferro. B) Afloramento de metadiamicrito hematítico, mostrando acamamento sedimentar (S_0) paralelo à foliação S_1 (linha branca, S_0/S_1), e hematita concentrada em S_2 (linha amarela), discordante de S_0/S_1 (Vilela 2010). C) Metadiamicrito hematítico com alta concentração de hematita especular.

5. APLICAÇÃO LOCAL DOS MÉTODOS E RESULTADOS

Neste estudo de caso, procurou-se comparar os resultados encontrados nos processamentos dos dados geofísicos e de sensoriamento remoto com o mapa geológico de detalhe, elaborado pela equipe da Sul Americana de Metais S.A. (SAM), a partir de trabalho de campo e densa malha de sondagem (com cerca de 450 furos sobre a área englobada no mapa).

5.1. Caracterização da área do estudo de caso

A região estudada contém áreas requeridas pela SAM para pesquisa e exploração de minério de ferro (Figura 18). O estudo de caso focaliza uma área de 26,24km², situada na porção centro-sul da região de estudo.

Coberturas elúvio-coluvionares ocorrem sobre chapadas na maior parte da área. As chapadas são delimitadas por escarpas íngremes, escavadas por uma rede de drenagem que forma vales estreitos e profundos. A chapada central é delimitada ao norte pelo Córrego Mundo Novo, a leste pelo Córrego Lamarão e, a sul, pelo Córrego Capão Novo (Figura 18). Esta chapada é sustentada pelas rochas da Formação Nova Aurora, as quais estão localmente expostas nos vales delimitantes (Figura 18).

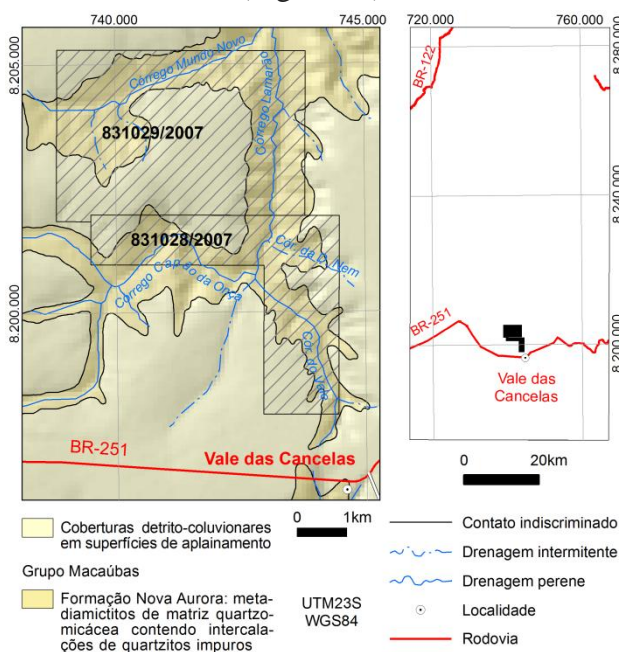


Figura 18. Localização das áreas de requerimento de lavra da SAM (DNPM 2014), sobre o mapa geológico regional (Mourão et al. 1996) e sobre a região focalizada.

5.2. Caracterização geológica

Na área do estudo de caso afloram metadiamicctito, metadiamicctito ferruginoso (essencialmente hematítico), quartzito branco, quartzito micáceo branco, quartzito micáceo amarelo e filito (Vilela 2010 - Figura 19).

Metadiamicctito magnetítico foi identificado em furos de sondagem. Vilela (2010) descreve detalhadamente a petrografia das rochas desta área, a seguir resumida:

Metadiamicctito estéril: ocorre tanto na base quanto no topo da sucessão litológica que contém a mineralização de ferro; contém quantidade insignificante de hematita ou magnetita, contidos na matriz composta por quartzo, muscovita, clorita e biotita, com carbonato e feldspato subordinados. Esta matriz envolve clastos de quartzo, quartzito, filito, rocha carbonática, granitóide e xisto.

Metadiamicctito hematítico: contém hematita (ligeiramente magnética) em quantidade variável de 5% a 78% (em volume). A tonalidade da rocha varia de cinza claro a escuro, de acordo com o aumento da concentração de hematita. A matriz é similar à do diamictito estéril, mas contém quantidades maiores de hematita fina disseminada, hematita especular concentrada em bandas, e traços (<1%) de magnetita (Figura 20). A quantidade de hematita diminui de oeste para leste, sendo que, a nordeste e leste, o metadiamicctito hematítico tem forte magnetismo e presença de magnetita de até 1mm de diâmetro.

Quartzito hematítico: ocorre em poucos afloramentos ao longo do Córrego Mundo Novo. Trata-se de um quartzito compacto, cinza, com hematita fina e magnetita subordinadas.

Metadiamicctito magnetítico cinza: identificado somente em furos de sondagem na área do estudo de caso, caracteriza-se pela inversão na quantidade de hematita e magnetita. A magnetita pode estar disseminada na matriz, como porfiroblastos euédricos de até 1mm de diâmetro, ou como componente principal concentrado em bandas. A hematita, que nem sempre está presente, é fina e disseminada na matriz, ou especular, nas bandas onde a magnetita está concentrada.

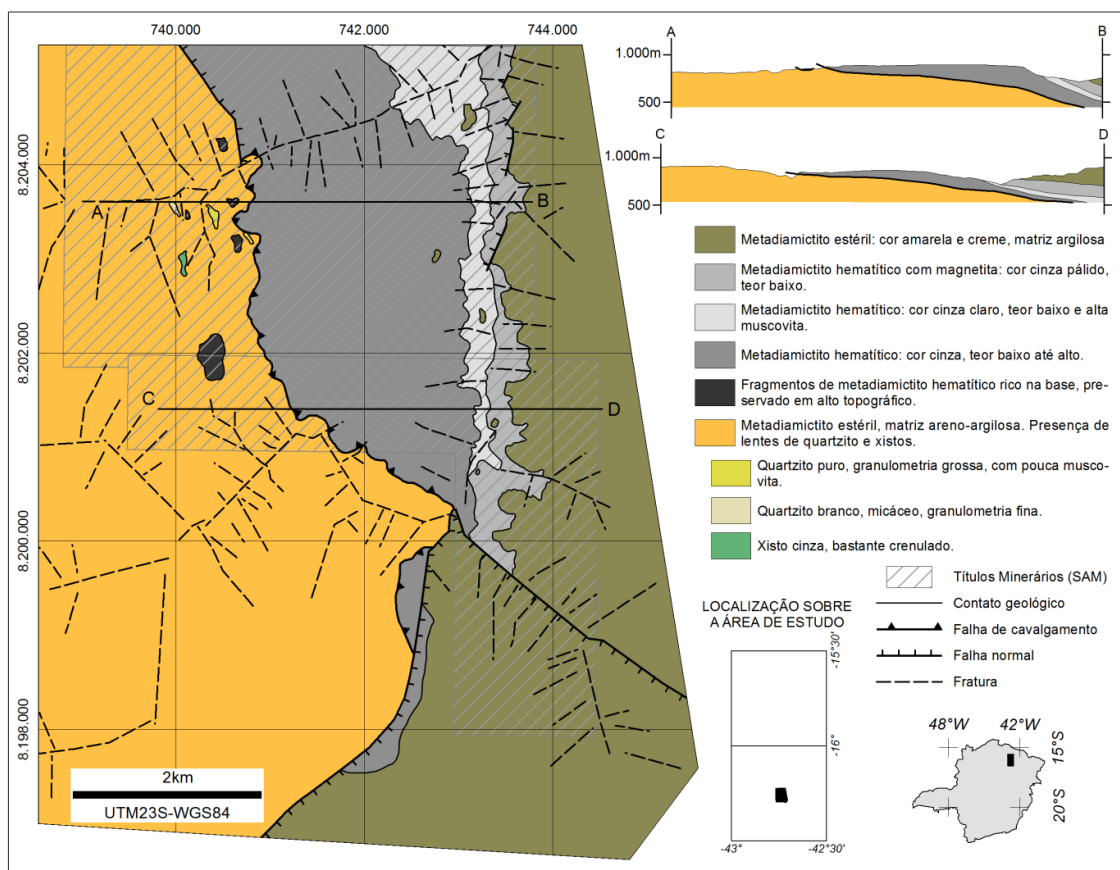


Figura 19. Mapa geológico (sem coberturas) da área do estudo de caso (modificado de Vilela 2010 e SAM 2013).

Ocorrem ainda quartzitos de distribuição esparsa, que podem se apresentar nas variedades: branco, de granulação fina, límpido, com grãos arredondados, e argilo-minerais intersticiais; micáceo branco, com granulação fina a média, muscovita e lentes caulínicas marcando o acamamento; micáceo amarelo, amarelo a bege, composto por quartzo de granulação fina a média e grande quantidade de muscovita. Filito ocorre em meio ao diamiccito estéril, podendo conter cristais de magnetita milimétrica (<5% vol.).



Figura 20. Metadiamiccito hematítico (UTM23S-WGS84, 741.246E, 8.201.332N)

5.3. Interpretação dos dados geofísicos e de sensoriamento remoto

Realizou-se um recorte nos dados de geofísica com o objetivo de se avaliar os resultados em detalhe compatível com a área do estudo de caso. Aplicou-se os mesmos métodos e técnicas do estudo regional, e selecionou-se os resultados que dão maior realce às feições da área.

5.3.1. Amplitude do Sinal Analítico

Na área do estudo de caso, o diamiccito hematítico está sobreposto ao metadiamiccito estéril como resultado de uma falha de empurrão com movimento de topo para oeste. Na base desta falha, o minério foi concentrado por lixiviação durante a deformação, resultando em uma formação ferrífera com grande concentração de hematita e/ou magnetita, muito magnética, onde há níveis quase inteiramente compostos por hematita e magnetita (Figura 21). O resultado do cálculo da amplitude do sinal analítico para esta área realçou as anomalias magnéticas que, na análise regional, se mostraram muito menos evidentes.



Figura 21. Bloco de formação ferrífera rica em hematita especular (“Marco Zero”), aflorante no topo da chapada (UTM23S-WGS84, 740.468E, 8.201.919N).

Anomalias magnéticas positivas são vistas na porção centro-nordeste da área (Figura 22 e 23b), coincidindo com os contatos do metadiamicrito hematítico. Uma grande anomalia negativa é vista na porção sudeste da área. Nota-se que as anomalias negativas coincidem, em geral, com as regiões onde afloram os diamictitos estéreis.

5.3.2. Deconvolução de Euler

O algoritmo de Deconvolução Euler 3D (Thompson 1982) foi executado sobre a área de pesquisa de minério de ferro, com a finalidade de se comparar os resultados estimados das profundidades das fontes magnéticas com os dados de campo e sondagem da SAM (Figura 22). Foi utilizado o índice estrutural $N=1$, correspondente a corpo planar de duas dimensões, que é o tipo de geometria mostrado em perfis controlados por sondagem. O processamento gerou 59 soluções para o estudo de caso, estimando profundidades para as fontes magnéticas entre 0 e 452m, sendo que cerca de 60% das soluções encontradas indicam profundidade de até 200m, e cerca de 22% das medidas indicam profundidade de até 300m. Comparando-se com as seções geológicas no mapa da Figura 19, pode-se observar que os pontos gerados pelas soluções da Deconvolução de Euler são coerentes com as profundidades encontradas na pesquisa mineral na área.

5.3.3. Índice de realce da hematita

O cálculo do índice para realce de hematita em solo utilizando as bandas visíveis do sensor, foi executado para a área de estudo de detalhe. Neste caso, fica bem nítido o realce nas regiões onde o solo está exposto, aparecendo em cor vermelha na imagem (Figura 23c). As

coberturas vegetais (eucaliptos e cerrado nas chapadas, mata ciliar fechada e cerrado nos vales) mascaram a presença da hematita no solo.

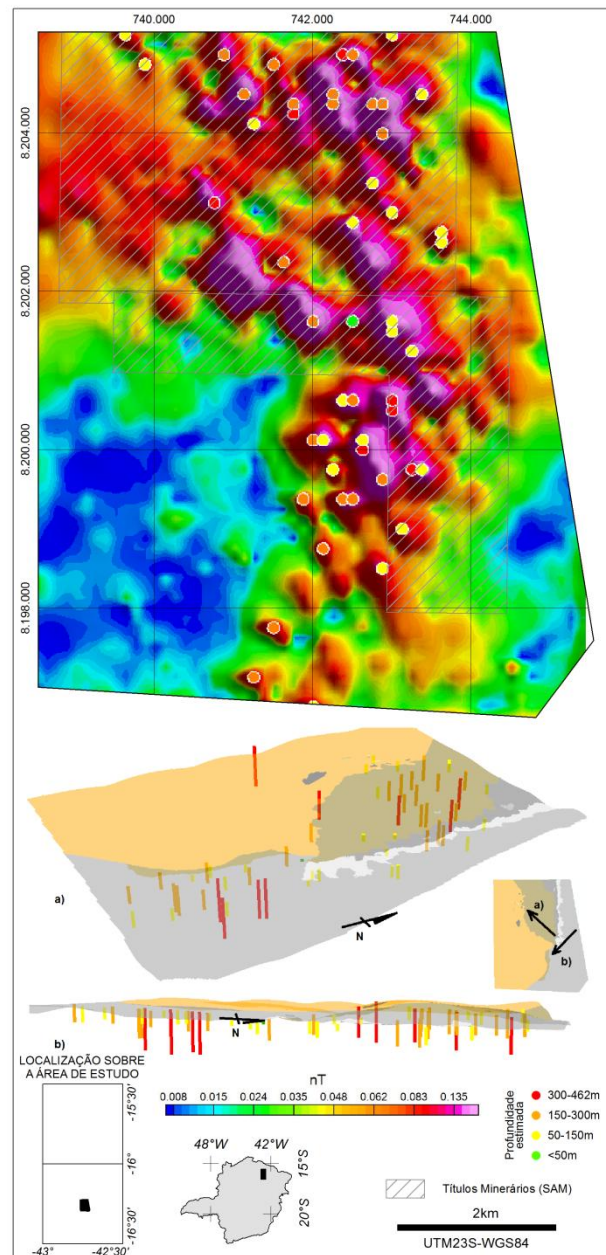


Figura 22. Mapa de soluções da Deconvolução de Euler, associado à amplitude do sinal analítico. Visualização das profundidades das soluções de Euler sobre o mapa geológico: a) visada NW; b) visada EW.

5.3.4. Laterita e colúvios

Foram calculadas as razões Th/K, que realça as concentrações anômalas de tório em lateritas, onde o elemento é, no intemperismo, precipitado com óxidos de ferro, e a razão U/K, que mostra a concentração do urânio, mais móvel que o tório, em colúvios. Como o potássio é o mais móvel destes três elementos, é

utilizado nas razões para realçar as concentrações dos outros dois.

A razão Th/K (Figura 23d) mostra o tório concentrado nas coberturas lateríticas dos altos topográficos. Nota-se que, mesmo onde há anomalia magnética negativa, existe concentração de tório na chapada, mostrando que a presença destas anomalias não indica necessariamente uma concentração significativa de hematita naquela região. As anomalias de Th podem também ser explicadas pela marcante presença de fosfato (apatita) nas lateritas da área (Viveiros *et al.* 1979, Vilela 2010). A razão U/K mostra grande concentração de urânio em relação ao potássio nos vales, onde há maior presença de colúvios (Figura 23e).

5.3.5. Composição ternária K-Th-U

Neste caso a imagem mostra que, nas coberturas lateríticas, o potássio já foi praticamente todo lixiviado e só aparece, em tons de vermelho, nas regiões dos vales que circundam estas chapadas (Figura 23f). Tons de roxo mostram a presença de urânio nestas áreas, assim como sobre as coberturas, em tons de ciano. O tório aparece em maiores concentrações nos topos das chapadas, mas também está presente nos vales, nos pontos de cores ciano e amarelo.

5.3.6. Modelagem espacial

O processamento das imagens foi executado conforme a modelagem de dados descrita no item 4.1.2. (Figura 16).

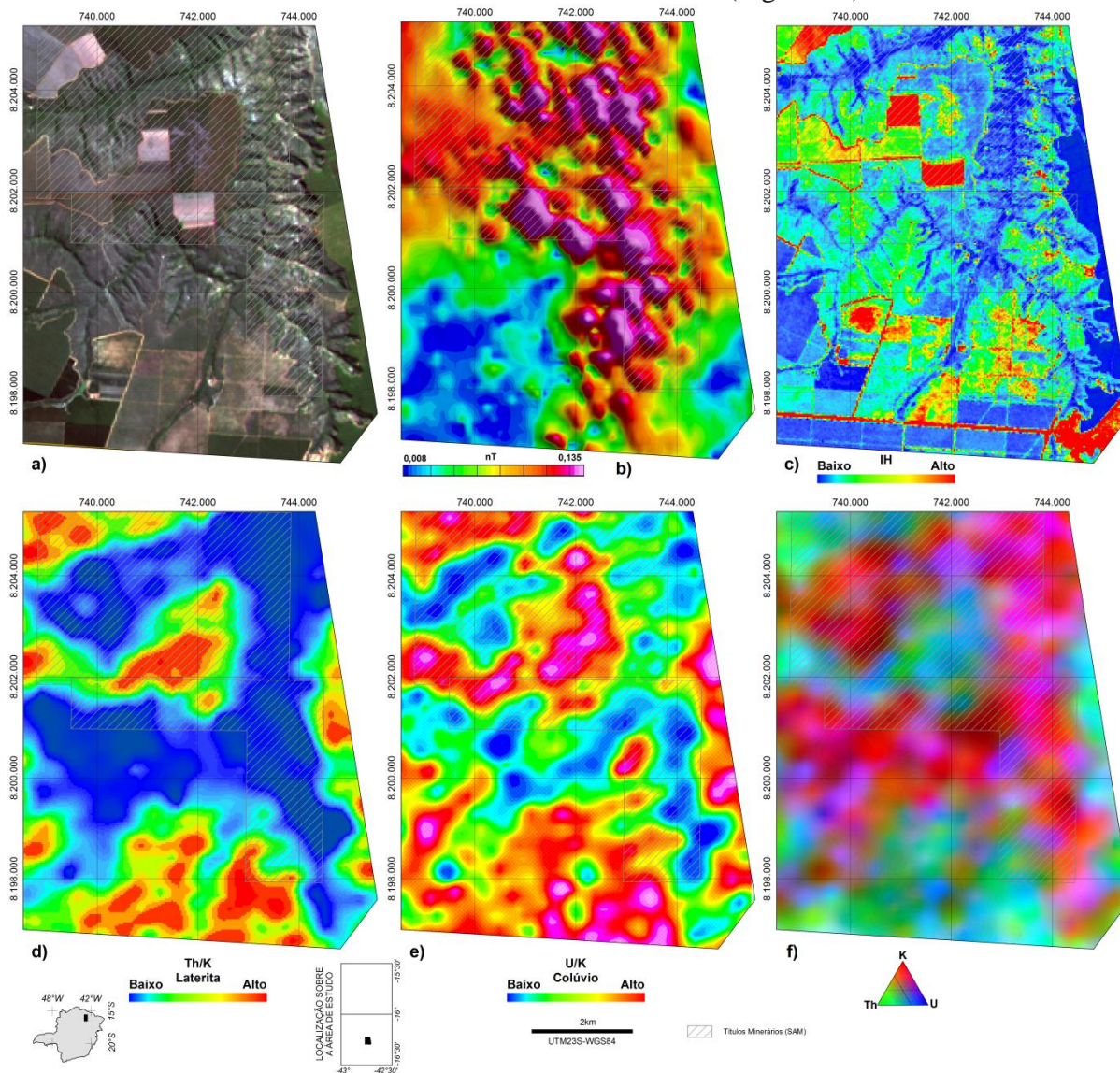


Figura 23. a) composição colorida r4g3b2 (cores naturais) da imagem Landsat 8 (aquisição em 21/5/2013) mostrando a geomorfologia da área com as coberturas que sustentam o relevo circundadas por vales onde afloram as rochas da Formação Nova Aurora; b) amplitude do sinal analítico, exibindo as anomalias magnéticas positivas sobre as áreas da SAM; c) índice para realce de hematita, sugerindo alta concentração de hematita nas áreas onde há solo exposto; d) razão Th/K, mostrando as altas concentrações de tório sobre as coberturas; e) razão U/K, mostrando a maior concentração de urânio nos colúvios que circundam as coberturas; f) composição ternária de K-Th-U.

As imagens foram então reclassificadas, transformando-se sua faixa de valores em uma faixa que varia de 0 a 1, onde 0 indica a menor favorabilidade, que aumenta até a máxima favorabilidade no valor 1. Foram utilizadas para este fim as funções *Fuzzy Large*, e *Small*.

Às imagens de ASA, Th/K, U/K, IH e APC-Fe foi aplicado o operador *Large*. À composição ternária K-Th-U e à APC-arg foi aplicado o operador *Fuzzy Small*. As imagens reclassificadas IH e APC-Fe foram combinadas utilizando-se o produto algébrico *Fuzzy* (Bonham-Carter 1994). As imagens reclassificadas de Th/K e U/K foram combinadas utilizando-se a soma algébrica *Fuzzy* (Bonham-Carter 1994 - Figura 24).

As imagens resultantes foram então combinadas utilizando-se o operador *Fuzzy gama* (Bonham-Carter, 1994). O índice de importância γ (gamma), que varia entre os valores de 0 e 1, define a importância de cada membro do operador. No caso deste trabalho, os dados foram modelados de forma que maiores valores refletem maior favorabilidade para a ocorrência

de minério de ferro. Depois de uma sequência de testes, o valor de γ definido para esta análise foi $\gamma=0,9$, que atribui maior importância ao termo "soma algébrica *Fuzzy*", que evidencia os maiores valores dos dados (Figura 24).

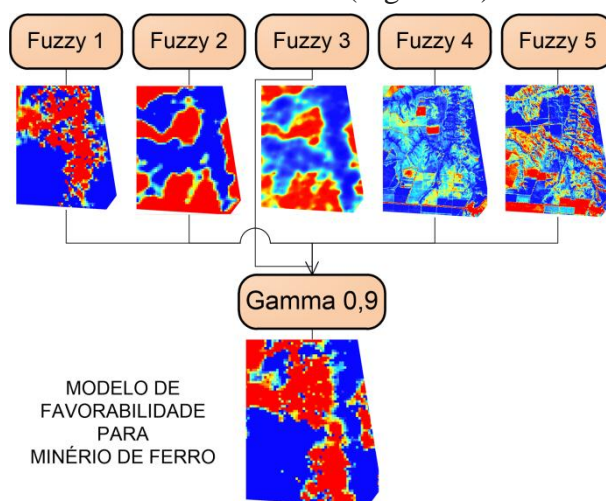


Figura 24. Fluxograma de processo para análise para geração de modelo prospectivo para minério de ferro, baseado em modelo guiado pelo conhecimento utilizando-se lógica *Fuzzy* para a área de pesquisa da SAM.

A imagem resultante deste operador é o mapa de favorabilidade para minério de ferro na área de estudo (Figura 25).

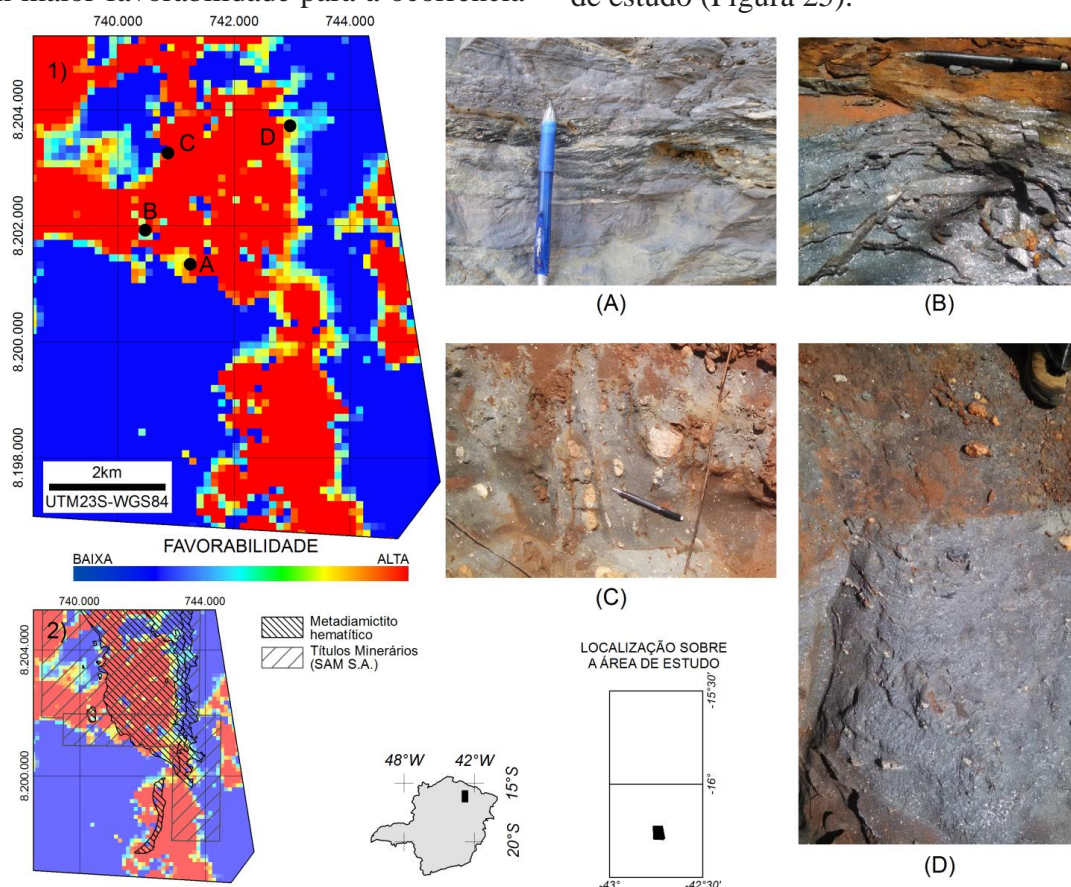


Figura 25. Mapa 1: modelo prospectivo para minério de ferro, mostrando áreas com alta favorabilidade à prospecção em vermelho e localização dos pontos A, B, C e D (afloramentos de metadiamiccito hematítico descritos em campo). Mapa 2: modelo prospectivo para minério de ferro, mostrando as áreas de requerimento de lavra da SAM e os limites da unidade que contém o minério. A, B, C e D: afloramentos de metadiamiccito hematítico (A - UTM23S-WGS84 741.246E, 8.201.332N; B - UTM23S-WGS84 740.468E, 8.201.919N; C - UTM23S-WGS84 740.858E, 8.203.248N; D - UTM23S-WGS84 742.962E, 8.203.719N).

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS:

Os resultados obtidos para o modelo prospectivo se mostraram coerentes com os dados existentes. Para os dados regionais e locais, foram criados modelos prospectivos que mostram as regiões de maior favorabilidade para minério de ferro.

No modelo regional, as áreas favoráveis se apresentam como manchas dispersas, menos frequentes somente nas regiões a noroeste da área de estudo (Figura 1).

As manchas mais definidas e maiores se concentram nas regiões leste e centro-sul da área, coerentes com a distribuição das áreas dos processos minerários cadastrados no DNPM. Os pontos onde há ocorrência de minério de ferro coincidem com áreas de maior favorabilidade do modelo.

Em relação aos domínios magnetométricos, as manchas se concentram mais nas regiões definidas para os domínios 1 e 2, embora ocorram com áreas menores e mais esparsas no domínio 4 (Figura 7). Os domínios gamaespectrométricos não têm relação clara com o modelo prospectivo, porque as unidades que contêm o minério estão em grande parte abaixo de coberturas lateríticas (Figura 11).

Também devido às extensas coberturas na área, nenhum refinamento na cartografia geológica relacionada às formações ferríferas foi possível.

O modelo criado para o estudo de caso se mostrou coerente com o mapa geológico cedido pela SAM, assim como também se mostraram coerentes as profundidades estimadas para as fontes magnéticas geradas por Deconvolução de Euler, quando comparadas com as espessuras do corpo de minério mostradas nas seções geológicas controladas por sondagem (Figuras 19 e 22). Os pontos de controle coletados em campo mostram correspondência entre o modelo e a ocorrência do minério (Figura 25).

7. CONCLUSÃO

A integração de dados aerogeofísicos e de sensores remotos vem sendo cada vez mais utilizada em diversas áreas para realçar alvos de interesses os mais diversos. A prospecção mineral é uma área que tem aprimorado a aplicação de técnicas de integração de dados,

para utilização como ferramenta otimizadora dos trabalhos de pesquisa.

No presente trabalho foram gerados dados derivados de levantamentos geofísicos aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos, dados derivados de radar (SRTM) e de satélite (Landsat 8). Estes produtos foram gerados por interpretação visual e por processamento digital das imagens.

Somente o modelo digital de terreno, derivado de dados de radar (SRTM), não foi utilizado para a geração do modelo prospectivo, devido ao fato de que os depósitos de minério de ferro da região não tem o relevo como característica distintiva, já que se encontram, em muitos casos, recobertos pelas extensas chapadas existentes na área. Este dado foi utilizado para a descrição dos aspectos geomorfológicos da área de estudo.

Dentre todos os dados gerados foram selecionados os que melhor realçaram a feição procurada para se criar o modelo prospectivo. Este modelo, guiado pelo conhecimento, foi gerado utilizando-se lógica *Fuzzy*, método de caracterização de classes que é adequado para quando se trabalha com dados onde não há como se definir limites rígidos entre as classes.

Para os dados regionais foi criado um modelo prospectivo que mostra as regiões de maior favorabilidade para minério de ferro como manchas dispersas, menos frequentes somente nas regiões a noroeste da área de estudo.

Para os dados locais, referentes à área da SAM, foi gerado um modelo prospectivo que se mostrou compatível com as informações cedidas pela empresa e com os dados de campo.

Tanto o modelo regional como o local mostram correspondência entre as áreas consideradas mais favoráveis à prospecção de minério de ferro e os dados utilizados para validação, sejam pontos de campo, áreas de direito minerário do DNPM, mapa geológico local ou seções geológicas.

A grande extensão das coberturas lateríticas e seus colúvios mascaram as formações ferríferas nos produtos de geofísica gamaespectrométrica e naqueles gerados a partir das imagens do satélite Landsat 8. Isso se dá devido ao fato de a informação coletada por estes sensores reflete somente a resposta do material superficial do

terreno. O dado geofísico magnetométrico mostra informação referente a maiores profundidades mas, isolado, não é suficiente para delimitar de forma eficiente as áreas de favorabilidade à ocorrência de minério de ferro.

A integração das informações mostrou que, mesmo considerando a extensão das coberturas na área, foi possível restringir as áreas indicadas para prospecção na região.

Sugere-se que maior refinamento da análise poderia ser obtido com a associação de novos dados à análise, como dados de gravimetria, sísmica de refração e/ou eletrorresistividade.

8. AGRADECIMENTOS

À Sul Americana de Metais (SAM) e Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F., Marshak S., Pedrosa-Soares, A.C., Peres, G.G., Cruz, S., Whittington, A. (2006). Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, **149**:43-64.
- Alkmim, F.F., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M. & Cruz, S. (2007). Sobre a evolução tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. *Geonomos*, **15**:25-43.
- Babinski, M., Pedrosa-Soares, A.C., Trindade, R.I.F., Martins, M., Noce, C.M., Liu, D. 2012. Neoproterozoic glacial deposits from the Araçuaí orogen, Brazil: Age, provenance and correlations with the São Francisco craton and West Congo belt. *Gondwana Research*, **21**:451–465.
- 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, 229p.
- Bonham-Carter G.F. (1994). Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Ontario. Pergamon Press. 398 p.
- Boyle, R.W. (1982). Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. *Developments in Economic Geology*, **16**:71–78.
- Buffon, S.A., Strieder, A.J. 2005. Processamento e modelagem de dados aerogeofísicos no Distrito Mineiro de Ametista do Sul. *Seminário - geologia e mineração em áreas de garimpo de pedras preciosas no Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul
- Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.; D'Alge, J.C. (2001) *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos, INPE, Disponível em <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf> acessado em 12/05/2013. 345p.
- Chavez Jr., P.S. & Kwarteng, A.Y.. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogramm. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**(3):339-348.
- CODEMIG-SEDE-CPRM. (2006). Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais, Programa 2005/2006. Área 8: Minas Novas – Riacho dos Machados – Espinosa. *Relatório final do levantamento e processamento de dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. Vol. 1 – Texto técnico. Belo Horizonte. 201p.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral, (2014). *SIGMINE - Sistema de Informações Geográficas da Mineração*. <http://www.dnpm.gov.br/>. acesso em 13/05/2014
- Grossi-Sad, J.H., Lobato, L.M., Pedrosa-Soares, A.C. & Soares-Filho, B.S. (1997) (eds). *Projeto Espinhaço em CD-ROM*. CODEMIG, Belo Horizonte, 2693 p. e 23 mapas.
- Gunn, P.J.. (1997). Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2):105-113.
- King, L. (1956) Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, **18**(2):147-266.

- Kuchenbecker, M., Pedrosa-Soares, A.C., Babinski, M. & Fanning, M. (2015). Detrital zircon age patterns and provenance assessment for pre-glacial to post-glacial successions of the Neoproterozoic Macaúbas Group, Araçuaí orogen, Brazil. *Precambrian Research* (aceito).
- Maas, M.V.R., Oliveira, C.G., Pires, A.C.B., Moraes, R.A.V.. (2003). Aplicação de geofísica aérea na exploração mineral e mapeamento geológico do setor sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe. *Revista Brasileira de Geociências*. **33**(3):279-288
- Marshak, S., Alkmim, F.F., Whittington, A. & Pedrosa-Soares, A.C. (2006). Extensional collapse in the Neoproterozoic Araçuaí orogen, eastern Brazil: A setting for reactivation of asymmetric crenulation cleavage. *Journal of Structural Geology*, **28**:129-147.
- Mourão, M. A. A., Roque, N. C., Grossi Sad, J.H. (1996). *Mapa Geológico da Folha Padre Carvalho - Projeto Espinhaço. Escala 1:100.000*. Belo Horizonte: Companhia Mineradora de Minas Gerais/COMIG. In: CODEMIG (2012), *Projeto Criação De Banco de Dados Geográfico para os Mapas Geológicos do Projeto Espinhaço, Minas Gerais*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais/CODEMIG <<http://www.codemig.com.br/>>. Acesso em 1/12/2012
- Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Wiedemann, C.M. & Pinto, C.P. (2001). The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research*, **110**:307-323.
- Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Alkmim, F.F., Silva, L.C., Babinski, M., Cordani, U. & Castañeda, C. (2007). Orógeno Araçuaí: Síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. *Geonomos*, **15**:1-16.
- Pedrosa-Soares, A.C. & Alkmim, F.F. (2011). How many rifting events preceded the development of the Araçuaí–West Congo orogen? *Geonomos*, **19**:244-251.
- Pedrosa-Soares, A.C., Babinski, M., Noce, C., Martins, M., Queiroga, G., Vilela, F.T. (2011). The Neoproterozoic Macaúbas Group (Araçuaí orogen, SE Brazil) with emphasis on the diamictite formations. In: Arnaud, E.; Halverson, G. P.; Shields-Zhou, G. (eds), *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*. Geological Society of London, Memoir **36**:523-534.
- Roque, N.C., Guimarães, M.L.V., Noce, C.M., Knauer, L.G., Grossi Sad, J.H. (1996). Mapa Geológico da Folha Rio Pardo de Minas - Projeto Espinhaço. Escala 1:100.000. Belo Horizonte: Companhia Mineradora de Minas Gerais/COMIG. In: CODEMIG (2012), *Projeto Criação De Banco de Dados Geográfico para os Mapas Geológicos do Projeto Espinhaço, Minas Gerais*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais - CODEMIG. <http://www.codemig.com.br/> Acesso em 1/12/2012.
- Saadi, A., Pedrosa-Soares, A.C. (1990). Um graben cenozoico no Médio Jequitinhonha, MG. In: I Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, Belo Horizonte. *Boletim do Núcleo Minas Gerais: SBG Núcleo MG*, **11**:101-124.
- Saadi, A. (1995). A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. *Geonomos* **3**(1):41-63
- SAM - Sul Americana de Metais S.A. (2013). Mapa Geológico-Estrutural Integrado com Sondagem e Topografia - Bloco 8, Alvarás de Pesquisa 831.028/2007-831.029/2007. SAM - Sul Americana de Metais S.A. (Relatório Técnico)
- Schobbenhaus, C. (1972). *Estudo geoeconômico preliminar do depósito de Ferro do Rio Peixe Bravo, Norte de Minas Gerais*. Série Geologia Econômica, 8. Div. Geologia, Sup. Des. Nordeste - SUDENE, Recife, 36 p.
- Sordi, D.A. de. (2007). Aerogeofísica aplicada à compreensão do sistema de empurrões da Sequência Santa Terezinha de Goiás, Brasil Central. Dissertação de mestrado em Geologia. UnB - Universidade de Brasília. Brasília.
- Thompson, D. T. (1982) EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, **47**:31-37
- Uhlein, A. (1991). Transição craton-faixa dobrada: um exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais: Aspectos

- estratigráficos e estruturais. São Paulo, IG-USP, Tese de Doutorado.
- Uhlein, A., Trompette R. & Alvarenga, C. (1999). Neoproterozoic glacial and gravitational sedimentation on a continental rifted margin: The Jequitaiá-Macaúbas sequence (Minas Gerais, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **12**:435-451.
- USGS - United States Geological Survey. (2013) *Landsat Missions*, <http://landsat.usgs.gov> Acesso em 13/9/2013.
- USGS. (2004). Reprocessing by the GLCF. (1, 3, 30) Arc Second SRTM Elevation, Reprocessed to GeoTIFF. College Park, Maryland: The Global Land Cover Facility. Version 1.0.
- Vilela, F.T. (2010). Caracterização de metadiamicritos ferruginosos da Formação Nova Aurora (Grupo Macaúbas, Orógeno Araçuaí) a Oeste de Salinas, MG. Dissertação de Mestrado. IGC-UFMG.
- Vilela, F.T., Pedrosa-Soares, A.C., Carvalho, M.T.N., Arimatéia, R., Santos, E., Voll, E. (2014). Metalogênese da Faixa Araçuaí: o Distrito Ferrífero Nova Aurora (Grupo Macaúbas, norte de Minas Gerais) no contexto dos recursos minerais do Orógeno Araçuaí. In: Silva, M.G., Rocha Neto, M.B., Jost, H., Kuyumjian, R.M. (org.) *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM. p415-430.
- Vilela, O.V. (1986). As jazidas de minério de ferro dos municípios de Porteirinha, Rio Pardo de Minas, Riacho dos Machados e Grão-Mogol, norte de Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C. & Coelho, C.E.S. *Principais Depósitos Mineraiis do Brasil: Ferro e Metais da Indústria do Aço*, **2**:111-120.
- Viveiros, J.F.M., Sá, E.L., Vilela, O.V., Santos, O.M., Moreira, J.M.P., Holder-Neto, F. & Vieira, V.S. (1978). Geologia dos vales dos rios Peixe Bravo e Alto Vacaria, norte de Minas Gerais. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, **30**, Recife. SBG, Anais, **1**:243-254.
- Wilford, J.R., Bierwirth, P.N. & Craig M.A. (1997). Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2):201-216.
- 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, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*. **28**(4):643-656.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos para o modelo prospectivo se mostraram coerentes com os dados existentes. Para os dados regionais e locais, foram criados modelos prospectivos que mostram as regiões de maior favorabilidade para minério de ferro.

No modelo regional, as áreas favoráveis se apresentam como manchas dispersas, menos frequentes somente nas regiões a noroeste da área de estudo (Figura 30). As manchas mais definidas e maiores, se concentram nas regiões leste e centro-sul da área, coerentes com a distribuição das áreas dos processos minerários cadastrados no DNPM. Os pontos onde há ocorrência de minério de ferro, levantados em campo neste trabalho, ou no de Vilela (2010), que caracterizou petrograficamente o minério da região, coincidem com áreas de maior favorabilidade do modelo.

Em relação aos domínios magnetométricos, as manchas se concentram mais nas regiões definidas para os domínios 1 e 2, embora ocorram com áreas menores e mais esparsas no domínio 4 (Figura 16).

Os domínios gamaespectrométricos não têm relação muito clara com o modelo prospectivo, porque as unidades que contêm o minério estão em grande parte abaixo das coberturas detrito-lateríticas (Figura 21).

Também devido às extensas coberturas na área, nenhum refinamento na cartografia geológica relacionada às formações ferríferas foi possível.

O modelo criado para o estudo de caso da Empresa Sul Americana de Metais S.A. (vide artigo) se mostrou coerente com mapa geológico cedido pela empresa, assim como também se mostraram coerentes as profundidades estimadas para as fontes magnéticas geradas pela deconvolução de Euler, quando comparadas com as espessuras do corpo de minério mostradas nas seções geológicas.

Os pontos de controle coletados em campo mostram correspondência entre o modelo e a ocorrência do minério.

7. CONCLUSÃO

A integração de dados aerogeofísicos e de sensores remotos vem sendo cada vez mais utilizada em diversas áreas para realçar alvos de interesse dos mais diversos. A prospecção mineral é uma destas áreas que tem aprimorado ao longo do tempo a aplicação de técnicas de integração de dados para utilização como ferramenta para otimizar trabalhos de pesquisa.

Neste trabalho, foram gerados dados derivados de levantamentos geofísicos aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos, dados derivados de radar (SRTM) e de satélite (Landsat 8). Estes produtos foram gerados por interpretação visual ou por processamento digital das imagens.

Somente o modelo digital de terreno, derivado de dados de radar (SRTM), não foi utilizado para a geração do modelo prospectivo, devido ao fato de que os depósitos de minério de ferro da região não têm o relevo como característica distintiva, já que se encontram em muitos casos recobertos pelas extensas chapadas existentes na área. Este dado foi utilizado para a descrição dos aspectos geomorfológicos da área de estudo.

Dentre todos os dados gerados foram selecionados os que melhor realçaram a feição procurada para se criar o modelo prospectivo. Este modelo, guiado pelo conhecimento, foi gerado utilizando-se lógica *Fuzzy*, método de caracterização de classes que é adequado para quando se trabalha com dados onde não há como se definir limites rígidos entre as classes.

Para os dados regionais foi criado um modelo prospectivo que mostra as regiões de maior favorabilidade para minério de ferro como manchas dispersas, menos frequentes somente nas regiões a noroeste da área de estudo.

Também para os dados locais, referentes à área da SAM S.A., foi gerado o modelo prospectivo, que se mostrou compatível com as informações cedidas pela empresa e com os dados de campo.

Tanto o modelo regional como o local mostram correspondência entre as áreas consideradas mais favoráveis à prospecção de minério de ferro e os dados utilizados para validação, sejam pontos de campo, áreas de direito minerário do DNPM, mapa geológico local ou seções geológicas.

A grande extensão das coberturas detrítico-lateríticas recentes e seus colúvios mascaram as formações ferríferas nos produtos de geofísica gamaespectrométrica e naqueles gerados a partir das imagens do satélite Landsat 8. Isso se dá devido ao fato de a informação coletada por estes sensores refletirem somente a resposta do material superficial do terreno. O dado geofísico magnetométrico mostra informação referente a maiores profundidades mas, isolado, não é suficiente para delimitar de forma eficiente as áreas de favorabilidade à ocorrência de minério de ferro.

A integração das informações mostrou que, mesmo considerando a extensão das coberturas na área, foi possível restringir as áreas indicadas para prospecção na região.

Sugere-se que maior refinamento da análise poderia ser obtido com a associação de novas informações ao conjunto aqui apresentado, tais como dados de gravimetria, sísmica de refração ou eletrorresistividade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F.F., Marshak S., Pedrosa-Soares A.C., Peres G.G., Cruz S., Whittington A. 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, **149**:43-64.
- Alkmim F.F., Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M. & Cruz S. (2007). Sobre a evolução tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. *Geonomos*, **15**:25-43.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**:349-364.
- Babinski M., Pedrosa-Soares A.C., Trindade R.I.F., Martins M., Noce C.M., Liu D. 2012. Neoproterozoic glacial deposits from the Araçuaí orogen, Brazil: Age, provenance and correlations with the São Francisco craton and West Congo belt. *Gondwana Research*, **21**:451–465.
- 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, 229p.
- Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon Press. Ontario, 398pp.
- Buffon S.A., Strieder, A.J. 2005. Processamento e modelagem de dados aero-geofísicos no Distrito Mineiro de Ametista do Sul. Seminário - geologia e mineração em áreas de garimpo de pedras preciosas no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul
- Câmara G.; Davis C.; Monteiro A.M.; D'Alge J.C. 2001 *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos, INPE, Disponível em <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf> acessado em 12/05/2013. 345pp.
- Chavez Jr., P.S. & Kwarteng A.Y.. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogramm. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**(3):339-348.
- CODEMIG-SEDE-CPRM. 2006). Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais, Programa 2005/2006. Área 8: Minas Novas – Riacho dos Machados – Espinosa. *Relatório final do levantamento e processamento de dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. Vol. 1 – Texto técnico. Belo Horizonte. 201p.

- Geosoft 2010. *Oasis montaj Grav/Mag Interpretation*. Geosoft Incorporation, Toronto, 79p.
- Gonçalves-Dias T., Pedrosa-Soares A.C., Dussin I.A., Alkmim F.F., Caxito F.A., Silva L.C. & Noce C.M. 2011. Idade máxima de sedimentação e proveniência do Complexo Jequitinhonha na área-tipo (Orógeno Araçuaí): primeiros dados U-Pb (LA-ICP-MS) de grãos detríticos de zircão. *Geonomos*, **19**(2):121-130.
- Gradim R.J., Alkmim F.F., Pedrosa-Soares A.C., Babinski M. & Noce C.M. 2005. Xistos Verdes do Alto Araçuaí, Minas Gerais: Vulcanismo Básico do Rifte Neoproterozoico Macaúbas. *Revista Brasileira de Geociências*, **35**(4-suplemento):59-69.
- Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C. & Soares-Filho B.S. 1997 (eds). Projeto Espinhaço em CD-ROM. CODEMIG, Belo Horizonte, 2693 p. e 23 mapas.
- Gunn P.J.. 1997. Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2):105-113.
- King L. 1956 Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, **18**(2):147-266.
- Maas M.V.R., Oliveira C.G., Pires A.C.B., Moraes R.A.V. 2003. Aplicação de geofísica aérea na exploração mineral e mapeamento geológico do setor sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe. *Revista Brasileira de Geociências*, **33**(3):279-288.
- Machado N., Schrank A., Abreu F.R., Knauer L.G. & Almeida-Abreu P.A. 1989. Resultados preliminares da geocronologia UPb na Serra do Espinhaço Meridional. *Boletim do Núcleo Minas Gerais da Sociedade Brasileira de Geologia*, **10**:171-174.
- Marshak S., Alkmim F.F., Whittington A. & Pedrosa-Soares A.C. 2006. Extensional collapse in the Neoproterozoic Araçuaí orogen, eastern Brazil: A setting for reactivation of asymmetric crenulation cleavage. *Journal of Structural Geology*, **28**:129-147.
- Mourão M.A.A., Roque N.C., Grossi Sad J.H. (1996). Mapa Geológico da Folha Padre Carvalho - Projeto Espinhaço. Escala 1:100.000. Belo Horizonte:Companhia Mineradora de Minas Gerais/COMIG. In: CODEMIG (2012), Projeto Criação De Banco de Dados Geográfico para os Mapas Geológicos do Projeto Espinhaço, Minas Gerais. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais/CODEMIG. Acesso em 1/12/2012 <http://www.codemig.com.br/>.
- Noce C.M., Pedrosa-Soares A.C., Grossi-Sad J.H., Baars F.J., Guimarães M.L.V., Mourão M.A.A., Oliveira M.J.R. & Roque, N.C. 1997. Nova Divisão Estratigráfica Regional do Grupo Macaúbas na Faixa Araçuaí: O registro de uma bacia neoproterozóica. *Boletim do Núcleo Minas Gerais da Sociedade Brasileira de Geologia*, **14**:29-31.

- Pedrosa-Soares A.C., Alkmim, F.F. 2011 . How many rifting events preceded the development of the Araçuaí-West Congo orogen? *Geonomos*, **19**:244-251.
- Pedrosa-Soares A.C., Noce, C.M., Alkmim F.F., Silva L.C., Babinski M., Cordani U., Castañeda C. 2007. Orógeno Araçuaí: Síntese do Conhecimento 30 anos após Almeida 1977. *Geonomos* **15**(1):1-16.
- Pedrosa-Soares A.C., Alkmim F.F., Tack L., Noce C.M., Babinski M., Silva L.C. & Martins-Neto M.A. 2008. Similarities and differences between the Brazilian and African counterparts of the Neoproterozoic Araçuaí–West Congo orogen. *In*: Pankhurst R.J., Trouw R.A.J., Brito Neves B.B. & De Wit M.J. (eds) *West Gondwana: Pre–Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London, Special Publications, **294**:153–172.
- Pedrosa-Soares A.C., Babinski M., Noce C.M., Martins M., Queiroga G., Vilela F.T. 2011a. The Neoproterozoic Macaúbas Group (Araçuaí orogen, SE Brazil) with emphasis on the diamictite formations. *In*: Arnaud, E.; Halverson, G. P.; Shields-Zhou, G. (eds), *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*. Geological Society of London, Memoir **36**(49):523-534 (DOI: 10.1144/M36.49).
- Pedrosa-Soares A.C., de Campos C., Noce C.M., Silva L.C., Novo T., Roncato J., Medeiros S., Castañeda C., Queiroga G., Dantas E., Dussin I. & Alkmim F.F. 2011b. Late Neoproterozoic–Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. *Geological Society*, London, Special Publ., **350**:25-51.
- Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Wiedemann C.M. & Pinto C.P. 2001. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research*, **110**:307-323.
- Porto B. 2013. Projetos de mineração param e frustram o Norte de Minas. *Jornal Hoje em Dia*, edição de 03/11/2013, <http://www.hojeemdia.com.br/noticias/economia-e-negocios/projetos-de-minerac-o-param-e-frustram-o-norte-de-minas-1.189112>.
- Queiroga G.N. 2010. Caracterização de restos de litosfera oceânica do Orógeno Araçuaí entre os paralelos 17° e 21° S. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Doutorado, 180 p.
- Queiroga G.N., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Alkmim, F.F., Pimentel, M.M., Dantas, E., Martins, M., Castañeda, C., Suita, M.T.F. & Prichard, H. 2007. Age of the Ribeirão da Folha ophiolite, Araçuaí Orogen: The U-Pb Zircon (LA-ICPMS) dating of a plagiogranite. *Geonomos*, **15**:61-65.

- Roque N.C., Guimarães M.L.V., Noce C.M., Knauer L.G., Grossi Sad J.H. (1996). Mapa Geológico da Folha Rio Pardo de Minas - Projeto Espinhaço. Escala 1:100.000. Belo Horizonte: Companhia Mineradora de Minas Gerais/COMIG. In: CODEMIG (2012), Projeto Criação De Banco de Dados Geográfico para os Mapas Geológicos do Projeto Espinhaço, Minas Gerais. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais/CODEMIG. <http://www.codemig.com.br/> Acesso em 1/12/2012.
- Saadi A., Pedrosa-Soares A.C. 1990 Um graben cenozoico no Médio Jequitinhonha, MG. In: I Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, Belo Horizonte. *Boletim do Núcleo Minas Gerais*. Belo Horizonte: SBG Núcleo MG, **11**:101-124.
- Saadi A. 1995. A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. *Geonomos* **3**(1):41-63.
- SAM - Sul Americana de Metais S.A. 2013. Mapa Geológico-Estrutural Integrado com Sondagem e Topografia - Bloco 8, Alvarás de Pesquisa 831.028/2007-831.029/2007. SAM - Sul Americana de Metais S.A. (Relatório Técnico).
- Schobbenhaus C. 1972. Estudo geoeconômico preliminar do depósito de Ferro do Rio Peixe Bravo, Norte de Minas Gerais. *Série Geologia Econômica*, 8. Div. Geologia, Sup. Des. Nordeste - SUDENE, Recife, 36 p.
- Silva L.C, Pedrosa-Soares A.C., Teixeira L. & Armstrong R. 2008. Tonian rift-related, A-type continental plutonism in the Araçuaí Orogen, eastern Brazil: New evidence for the breakup stage of the São Francisco Congo Paleocontinent. *Gondwana Research*, **13**:527-537.
- Sordi D.A. de. 2007. Aerogeofísica aplicada à compreensão do sistema de empurrões da Sequência Santa Terezinha de Goiás, Brasil Central. Dissertação de mestrado em Geologia. UnB - Universidade de Brasília. Brasília.
- Suita M.T.F., Pedrosa-Soares A.C., Leite, C., Nilson A.A. & Prichard H. 2004. Complexos ofiolíticos do Brasil e a metalogenia comparada das faixas Araçuaí e Brasília. In: E. Pereira, R. Castroviejo & F. Ortiz (eds), *Complejos Ofiolíticos en Iberoamérica: guías de prospección para metales preciosos*. Madrid, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-CYTED (Proyecto XIII.1), p101-132.
- Thompson D.T. (1982) EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, **47**:31-37.

- Uhlein, A. 1991. Transição craton-faixa dobrada: um exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais: Aspectos estratigráficos e estruturais. São Paulo, IG-USP, Tese de Doutorado.
- Uhlein A., Trompette R. & Alvarenga C. 1999. Neoproterozoic glacial and gravitational sedimentation on a continental rifted margin: The Jequitaí-Macaúbas sequence (Minas Gerais, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **12**:435-451.
- USGS - United States Geological Survey. (2013) Landsat Missions., <http://landsat.usgs.gov>. Acessado em 13/9/2013
- USGS. 2004. Reprocessing by the GLCF. (1, 3, 30) Arc Second SRTM Elevation, Reprocessed to GeoTIFF. College Park, Maryland: The Global Land Cover Facility. Version 1.0.
- Vilela F.T. (2010). Caracterização de metadiamicritos ferruginosos da Formação Nova Aurora (Grupo Macaúbas, Orógeno Araçuaí) a Oeste de Salinas, MG. Dissertação de Mestrado. IGC-UFMG.
- Vilela F.T., Pedrosa-Soares A.C., Carvalho M.T.N., Arimatéia R., Santos E., Voll E. 2014 Metalogênese da Faixa Araçuaí: o Distrito Ferrífero Nova Aurora (Grupo Macaúbas, norte de Minas Gerais) no contexto dos recursos minerais do Orógeno Araçuaí. In: Silva, M.G., Rocha Neto, M.B., Jost, H., Kuyumjian, R.M. (org.) 2014. *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM. p415-430.
- Vilela, O.V. (1986). As jazidas de minério de ferro dos municípios de Porteirinha, Rio Pardo de Minas, Riacho dos Machados e Grão-Mogol, norte de Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C. & Coelho, C.E.S. *Principais Depósitos Minerais do Brasil: Ferro e Metais da Indústria do Aço*, **2**:111-120.
- Viveiros J.F.M., Sá E.L., Vilela O.V., Santos O.M., Moreira J.M.P., Holder-Neto F. & Vieira V.S. 1978. Geologia dos vales dos rios Peixe Bravo e Alto Vacaria, norte de Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife. SBG, *Anais*, **1**:243-254.
- 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, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*. **28**(4)643-656.