

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Contribuição à pesquisa mineral de mineralizações
de ferro e ouro no Quadrilátero Ferrífero e entornos-
MG, via integração de dados geológicos e
aerogeofísicos.**

Matheus Mendes Ferreira de Faria

Orientador: Prof. Dr. Jorge Silva Bettencourt
Co-orientador: Renato Cordani

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF/08/39)

SÃO PAULO
2008

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Contribuição à pesquisa mineral de mineralizações
de ferro e ouro no Quadrilátero Ferrífero e entornos-
MG, via integração de dados geológicos e
aerogeofísicos.**

Matheus Mendes Ferreira de Faria



Orientador: Prof. Dr. Jorge Silva Bettencourt
Co-orientador: Renato Cordani

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF/08/39)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900025542

SÃO PAULO
2008

TF
F224
MMF.C

Congreso de la Unión
Gabinete de Oficina
de la Presidencia
de la Nación
Argentina



Decreto de creación del Comité Ejecutivo

Decreto de creación del Comité Ejecutivo
de la Caja de Pensiones para los Jubilados

Decreto de creación del Comité Ejecutivo

Agradecimentos

Agradeço a Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (Codemig) e ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) que disponibilizaram os dados aerogeofísicos do Programa 2001 (áreas 2 e 3) e Rio das Velhas (3007) respectivamente, ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo e ao aluno de forma gratuita e para uso exclusivamente acadêmico, possibilitando a realização do trabalho.

Aos geofísicos Eduardo Henrique e Renato Cordani, co-orientador do projeto, assim como todas as outras pessoas (Roberto Zanon, Paloma, Georgete e Eduardo Carvalho) que também fazem parte da empresa Reconsult, por terem oferecido suas instalações, softwares e todo apoio necessário referentes aos temas geofísicos; e principalmente ao Prof. Dr. Jorge Silva Bettencourt pela paciência, compreensão e todo suporte técnico dado ao projeto.

E por ultimo, aos meus pais e demais familiares que possibilitaram toda a minha educação e formação profissional.

Dedico este trabalho a toda a minha família, principalmente a minha mãe (Rosa) e a meu pai (Lourenço) por terem sido maravilhosos, sempre dando o máximo possível de cada para que eu me tornasse uma boa pessoa e pudesse ter uma boa formação. Aos meus irmãos e amigos Igor, Rodolfo, Vinícius, Juliano e Valéria por sempre terem me apoiado e me tratado de forma respeitosa, e a todas as outras pessoas que mesmo distantes sempre confiaram e acreditaram em mim.

Resumo

O Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado na parte sul do Cráton do São Francisco, é uma das maiores e mais importantes províncias metalogenéticas do mundo. A metalogênio do Quadrilátero Ferrífero é bastante variada e inclui depósitos *world class* de ferro, manganês e ouro.

A área estudada é situada a oeste do QF, é composta predominante por rochas do embasamento Arqueano, retrabalhadas durante o Paleoproterozóico, *greenstone belts* e por rochas pertencentes ao Supergrupo Minas.

A interpretação dos dados aerogeofísicos (magnéticos e gamaespectrométricos), cedidos pela Codemig e CPRM, foram reprocessados para este projeto. A partir destes foi possível selecionar quatro importantes anomalias magnéticas, caracterizadas por valores de grande amplitude geralmente associados à baixas contagens radiométricas. Essas anomalias representam alvos exploratórios, posteriormente confirmados por perfis de reconhecimento geológico. Dentro dos alvos exploratórios, BIF e cangas são os litotipos predominantes, e ocorrem aproximadamente a cinco a dez metros de profundidade, segundo modelagem geofísica realizada para o alvo quatro.

Discrepâncias entre os mapas geológicos e os mapas temáticos geofísicos são observadas. Um grande número de anomalias magnéticas parecem não ser representadas pelas litologias verificadas nos mapas geológicos. Este fato corrobora o uso sistemático dessa metodologia para o refinamento do mapeamento regional e dos modelos de exploração mineral.

Índice

1. Introdução.....	1
2. Objetivos e Justificativas.....	1
3. Fundamentação Bibliográfica	
3.1. Contexto Geológico Regional.....	2
3. 1. 2. Evolução Tectônico-Metamórfica do Quadrilátero Ferrífero.....	6
3. 1. 3. Evolução do <i>Greenstone Belt</i> Rio das Velhas.....	7
3. 2. Mineralizações.....	7
4. Materiais e Métodos: Revisão Conceitual.....	8
4. 1. Campo Magnético da Terra.....	9
4. 1. 2. Aeromagnetometria.....	10
4. 1. 3. Aerogamaespectrometria.....	11
4. 2. Software Utilizado.....	12
5. Apresentação dos Dados Aerogeofísicos.....	13
6. Seleção dos Alvos Exploratórios.....	17
7. Verificação “ <i>in situ</i> ” das Anomalias.....	26
8. Modelagem Geofísica: <i>Model Vision</i>	37
9. Discussões.....	38
10. Recomendações.....	44
11. Conclusões.....	44

1. Introdução

A atual demanda por insumos minerais para atender o grande desenvolvimento de países emergentes, principalmente China e Índia, assim como países desenvolvidos, tem compelido governos e empresas ao aumento no interesse por descobertas de novos depósitos minerais, afim de suprir a grande demanda mundial e aumentar reservas de minérios considerados estratégicos para o crescimento sustentável destes países.

Graças ao panorama internacional atual, os preços desses insumos sofreram e provavelmente continuarão sofrendo significativos reajustes. Somente a Vale, maior exportadora de minério de ferro do mundo, reajustou o preço do produto junto às siderúrgicas asiáticas e européias em 65% a 71% (para o minério de Carajás, de melhor qualidade) apenas neste ano, sendo que este é o sétimo reajuste consecutivo nos últimos sete anos, da ordem de US\$ 108 a tonelada. (Estado de São Paulo, 13 de março de 2008, Caderno Economia-Negócios, p. B24).

Em conseqüência desses aumentos, depósitos anteriormente considerados marginais possivelmente se tornarão economicamente viáveis, protominérios passarão a ser lavrados e o interesse pela descoberta de novos depósitos aumentará, exigindo um importante aumento no investimento destinado por empresas e governos à pesquisa mineral, aumento este já claramente observado.

2. Objetivos e Justificativas

O principal objetivo deste trabalho é integrar dados de geologia regional e aerogeofísicos, que deverão ser reinterpretados e refinados com vista à discriminação e caracterização de alvos de interesse à prospecção de ferro e ouro.

As informações sobre as ocorrências minerais inventariadas pela CPRM e mapas digitais das anomalias geofísicas, tanto de dados magnéticos quanto gamaespectrométricos, no programa Oasis Montaj, servirão de base inicial do trabalho. Vale ressaltar que os resultados dos produtos geofísicos disponíveis deverão ser adequados para a discriminação tectônica-estrutural e litológica da região, e para feições portadoras de mineralizações primárias de ferro e ouro.

A obtenção dos dados magnéticos e gamaespectrométricos dos levantamentos aerogeofísico foi feita junto à Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (Codemig) e junto ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Especificamente, os dados cedidos pela Codemig fazem parte do Levantamento Aerogeofísico Programa 2001, Áreas 2 e 3, e os fornecidos pela CPRM são do Programa Rio das Velhas (3007). Esses dados foram disponibilizados ao aluno e ao Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, sem ônus.

O Co-Orientador, Renato Cordani (geofísico), assim como a Reconsult, empresa prestadora de serviços em geofísica, exerceram papel fundamental no trabalho, pois foram responsáveis por todo o auxílio relativo às bases e procedimentos geofísicos.

3. Fundamentação Bibliográfica

3.1. Contexto Geológico Regional

Situado na porção sudeste do Cráton do São Francisco, na transição entre as partes estáveis do cráton a oeste e o Cinturão Móvel Atlântico a leste, o Quadrilátero Ferrífero, Figura 01, é ainda a principal e mais tradicional província melalogenética do Brasil; sendo o ouro, ferro, mármores, rochas magnesianas, manganês e minerais gema os principais bens minerados da região.

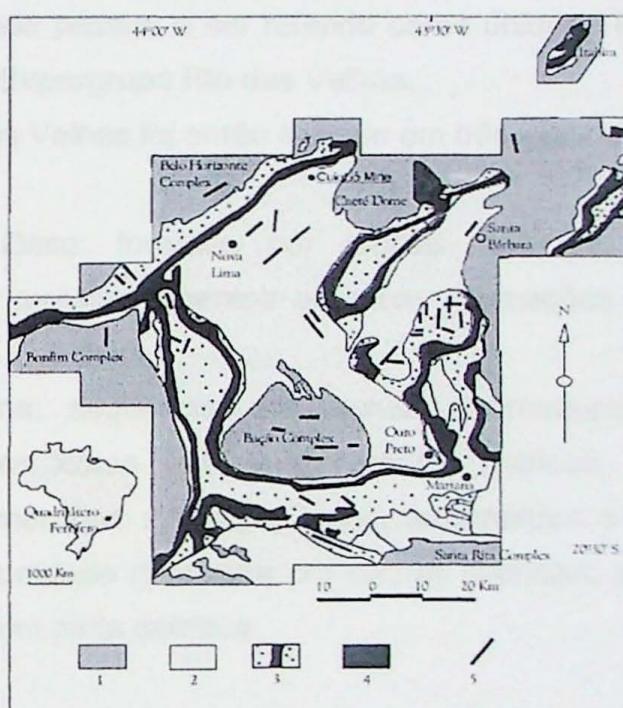


Figura 01: Imagem esquemática simplificada do Quadrilátero Ferrífero. 1-Terrenos granito-gnaíssicos, 2-supergrupo Rio das Velhas, 3-supergrupo Minas, 4-supergrupo Espinhaço e 5-diques máficos. Retirado de Silya et al. (2000).

Segundo Valladares (2004), os primeiros e clássicos trabalhos sobre a região se devem a Eschwege (1817, 1822, 1832), Derby (1906), Harder e Chamberlein (1915), Freyberg (1932, 1934), Barbosa (1935, 1939, 1954), Moraes e Barbosa (1939), Guimarães (1951, 1970), Pflug (1965, 1968), Pflug e Renger (1973) e Almeida (1977), entre outros, estabelecendo suas bases, até hoje válidas, sobre a geologia regional.

O primeiro mapeamento sistemático do Quadrilátero Ferrífero foi realizado pelo United States Geologic Survey (USGS) em cooperação com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), entre os anos de 1946-1962, com o principal objetivo a determinação das reservas de classe mundial de minério de ferro da região.

As rochas metassedimentares e vulcanossedimentares foram agrupadas, da mais antiga para a mais jovem, em três unidades principais denominadas como Série Rio das Velhas, Minas e Itacolomi. Na Série Rio das Velhas foram descritas por Dorr et al. (1957) e Dorr (1969) *apud*. Valladares (2004), rochas metavulcânicas, xistos, filitos, metagrauvacas e formações ferríferas bandadas do tipo Algoma (Grupo Nova Lima), como um ambiente eugeossininal do tipo Flysch; e conglomerados e quartzitos (Grupo Maquiné) como depósitos molássicos. As rochas graníticas e gnáissicas existentes foram interpretadas como intrusivas, posteriores às unidades metassedimentares e vulcassedimentares.

Trabalhos posteriores, Almeida (1976) e Schorscher (1976), reinterpretaram a Série Rio das Velhas como um possível *greenstone belt*; e Schorscher (1978) descreveu os primeiros komatíitos *spinifex*, reconhecendo a natureza vulcânica de um conjunto de rochas metaultramáficas, antes consideradas como intrusivas jovens, posteriores até mesmo que a Série Minas. Essa unidade passou a ser referida como unidade inferior denominada como Grupo Quebra Osso, do Supergrupo Rio das Velhas.

O Supergrupo Rio das Velhas foi então dividido em três grupos da base para o topo:

- Grupo Quebra Osso: formado por rochas metaultramáficas vulcânicas, com intercalações de metassedimentos químicos (formações ferríferas tipo Algoma e *metacherts*).
- Grupo Nova Lima: seqüências de rochas sedimentares químicas e clásticas, representadas por xistos predominantemente máficos, metabásicas, formações ferríferas, conglomerados, xistos grafitosos, carbonáticos e tufáceos.
- Grupo Maquiné: unidade composta por rochas clásticas; quarzitos, quartzo xistos e conglomerados com pirita detritica.

Supergrupos Minas, Espinhaço e Itacolomi

A Série Minas (Barbosa, A. 1968; Dorr, 1969) *apud*. Valladares (2004), redefinida como Supergrupo Minas por (Inda et al. 1984) *apud*. Valladares (2004), é constituída da base para o topo pelas seguintes unidades:

- Grupo Tamanduá: dividido em Quartzito Cambotas, formação basal de depósitos arenosos costeiros, em corpos lenticulares e descontínuos, formando como local tipo a serra homônima (Serra das Cambotas) e outras estruturas análogas com direção preferencial N-S, localizadas principalmente a leste do Quadrilátero Ferrífero; e uma formação superior, sem nome formal, composta por mica quartzitos, filitos, corpos restritos de formações ferríferas e xistos diversos.

- Grupo Caraça: formada por quartzitos e metaconglomerados piritosos, auríferos e uraníferos (Formação Moeda); e por filitos grafitos e formações ferríferas restritas (Formação Batatal).
- Grupo Itabira: composto pelas formações ferríferas tipo Lake Superior (Formação Cauê), e carbonatos/mármore e metamargas dolomíticas (Formação Gandarela), além de formações ferríferas hematítica-magnetíticas, quartzo-dolomítica, de fácies transicionais entre as duas formações.
- Grupo Piracicaba: formada por quartzitos, em geral finos, por vezes ferruginosos e micáceos, e filitos diversos (Formação Cercadinho); filitos, folhelhos e filitos carbonáticos (Formação Fecho do Funil); quartzitos finos (Formação Taboões); filitos grafitos (Formação Barreiro); e depósitos vulcânicos-clásticos, clásticos, e vulcanitos de uma seqüência vulcanossedimentar básica a ácida (Formação Sabará).

De acordo com Abreu (2004), Kneidl e Schorscher (1972), Schorscher (1973, 1975, 1976a,b, 1980a,c), Pflug e Renger (1973) e Amaral et al. (1976), entre outros, correlacionaram os quartzitos da Serra das Cambotas, Caraça e algumas outras estruturas e litologias análogas, como pertencentes ao Supergrupo Espinhaço. Segundo o mesmo autor, Schorscher e colaboradores (Alves, 1986; Santos, 1986; Barbosa, 1988; Schorscher et al. 1990, 1997; Luchesi, 1991; Schorscher, 1992; Guimarães, 1992; Davies, 1993; Monthé Fo., 1996) detalharam o Supergrupo Espinhaço no Quadrilátero Ferrífero e entornos, e reafirmaram a pene-contemporaneidade dos Supergrupo Minas e Espinhaço, que representariam depósitos distais e proximais respectivamente, da evolução sedimentar da margem continental paleoproterozóica do Cráton do São Francisco durante o Ciclo Minas/Espinhaço. Destes trabalhos resultaram algumas modificações estratigráficas, entre elas: (a) a exclusão do Grupo Tamanduá do Supergrupo Minas: sua formação basal, Quartzito Cambotas, foi incluída no Supergrupo Espinhaço; e a formação superior, sem nome formal, no Grupo Nova Lima. (b) a inclusão de uma unidade adicional na região da Serra do Cipó, denominada Seqüência de Xistos Verdes, na base do Supergrupo Minas. (c) inclusão de duas unidades adicionais na região de Itabira, Seqüência de Paragnisses e Seqüência de Xistos Verdes, na base do Supergrupo Minas. (d) a sugestão da exclusão da Formação Sabará do Grupo Piracicaba, devido à suas características vulcânicas-sedimentares que diferem das demais formações do grupo, constituídas por depósitos de plataforma estável.

Segundo Schorscher (1975, 1988, 1992) e Castro (1998) apud. Abreu (2004), o Ciclo Minas/Espinhaço iniciou-se no Paleoproterozóico Inferior, pela formação de um sistema de rift intracontinental com magmatismo diamantífero (representado pelos diamantes da Formação Sopa Brumadinho, Supergrupo Espinhaço) na crosta preexistente de terrenos TTG e granito-greenstone belt, formados nos estágios arqueanos. Posteriormente, seguiu-

se um período de sedimentação principal, em acompanhamento da evolução distensiva do sistema de rifte para uma margem passiva, com deposição proximal ao continente dos sedimentos do Supergrupo Espinhaço e em áreas mais distais do Supergrupo Minas, com fraco magmatismo/vulcânismo básico a ácido. A evolução teria terminado com a inversão da margem continental passiva para ativa, indicada pela sedimentação distal vulcanossedimentar sin-orogênica da Formação Sabará, numa orogênese colisional designada como Ciclo Minas/Espinhaço, que teria causado obdução, duplicação crustal, tectônica de nappes, metamorfismo regional progressivo de oeste para leste, em fácies xisto verde na região oeste e central do Quadrilátero Ferrífero, e fácies anfibolito superior a granulito na região leste da área.

Abaixo, segue a coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, Figura 02, admitida por Alkmim & marshak, (1998).

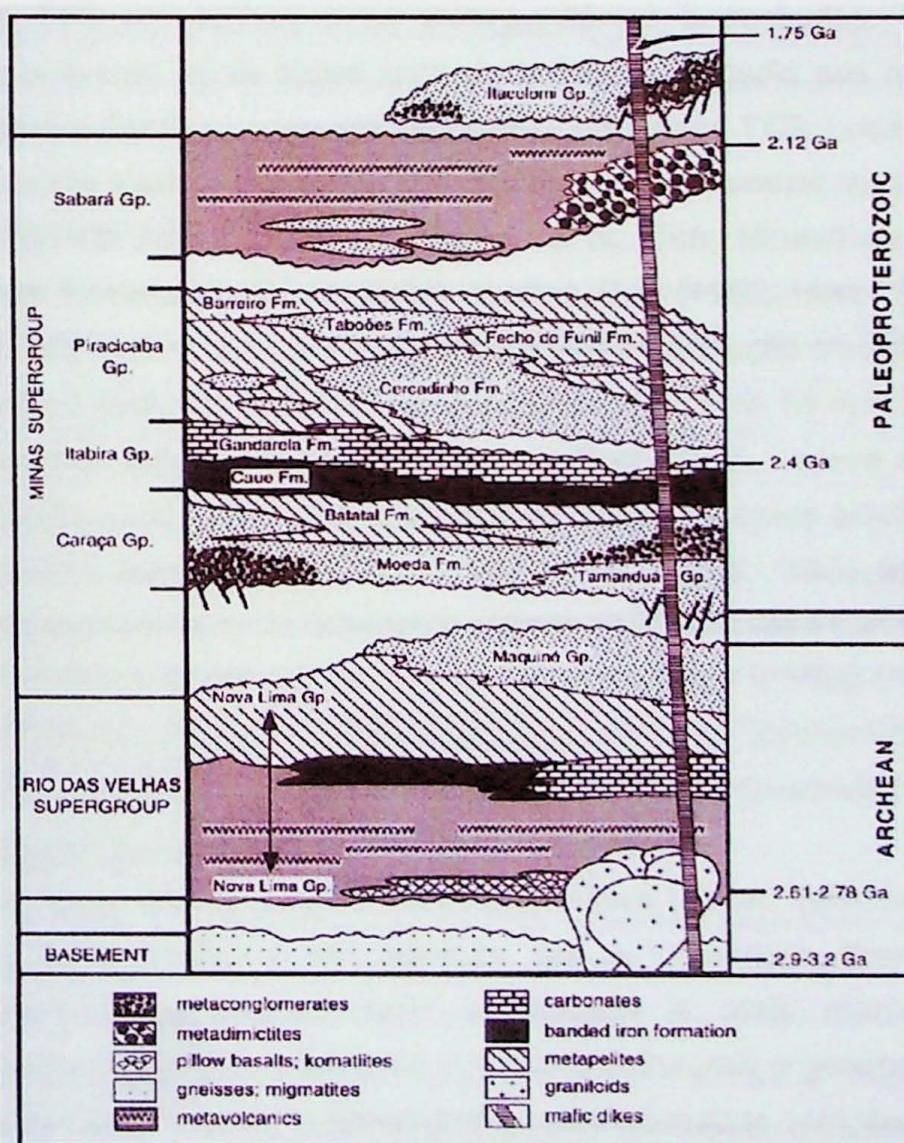


Figura 02: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, Alkmim & marshak, (1998). Retirada de Chissini et al. (2005).

3.1.2. Evolução Tectono-Metamórfica do Quadrilátero Ferrífero

A evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero ainda é alvo de discussões e controvérsias, com diferentes autores admitindo e interpretando sua evolução de maneiras diferentes. Porém, dois eventos maiores são marcantes, a orogênese Rio das Velhas, de idade Arqueana; e a orogênese pertencente ao Ciclo Minas/Espinhaço, ocorrida durante o Paleoproterozóico. Inseri-se também nesta idade o chamado “Cinturão Mineiro” (Teixeira et al., 1993, 1994 e 1995; apud Abreu 2004), verificado segundo Abreu (2004), apenas através da geocronologia em rochas tonalíticas-trondhjemíticas-granodioríticas (TTG) do embasamento arqueano.

Segundo Abreu (2004), a Orogênese Rio das Velhas encerrou, por volta de 2.9 – 2.7 Ga, o estágio de evolução crustal granito-greenstone belt arqueano na região E-SE do Cráton do São Francisco. Ainda segundo o mesmo autor, o principal registro deste evento pode ser verificado nas rochas supracrustais do greenstone belt homônimo, com metagranitóides TTG em domos, e os metagranitóides borrachudos. O metamorfismo associado a esse evento foi de fácies xisto-verde inferior a médio nas regiões centrais e leste do Quadrilátero Ferrífero e em grande parte dos terrenos TTG. Localmente atingiu as fácies xisto-verde alto a anfibolito inferior nas regiões oeste e noroeste do quadrilátero.

Ainda segundo Abreu (2004), a orogênese do Ciclo Minas/Espinhaço, de idade paleoproterozóica, foi considerada por alguns autores, Dorr (1969), Herz (1970), Schorscher (1975, 1980a, 1992), como o principal evento orogênico de evolução crustal da região.

Em relação à evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, há opiniões a respeito de processos autóctones, defendidas por autores como Dorr (1969), Ladeira e Viveiros (1984), Alkmin et al., (1994), apud Abreu (2004); e opiniões sobre processos alóctones, defendidas por Fleischer (1971), Schorscher (1975, 1976b, 1980a, 1988a, 1992) entre outros, apud Abreu (2004), para as unidades do Supergrupo Minas no Quadrilátero Ferrífero.

Também é admitida por alguns autores, Almeida Abreu e Pflug (1994) apud Abreu (2004), uma orogênese conhecida como Uruaçuana, de idade Mesoproterozóica, utilizada para explicar a evolução do Supergrupo Espinhaço a norte do Quadrilátero Ferrífero. Essa orogênese controvertida é admitida apenas por poucos autores.

Segundo Abreu (2004), autores como Brito Neves (1979), Teixeira (1982), Belo de Oliveira (1986), Endo (1987) e etc, afirmam que a Orogênese Brasiliiana, de idade Neoproterozóica à Eopaleozóica, como a principal e mais marcante diatromismo Proterozóico, baseando-se essencialmente em dados estruturais e geocronológicos; com a hierarquização das deformações, posteriormente correlacionadas com dados K-Ar, Ar-Ar e Rb-Sr oriundos em sua maioria de rochas e minerais de unidades mais antigas e policíclicas.

3.1.3. Evolução do “Greenstone Belt” Rio das Velhas

Segundo Schorchers (1992), para a formação da bacia vulcão-sedimentar Rio das Velhas, admite-se um ambiente inicial de crosta siálica tonalítica-trondhjemítica-granodiorítica (TTG) submersa, sujeita a rifteamento e magmatismo komatiítico não influenciado por sedimentação clástica derivadas de áreas continentais expostas. O magmatismo ultramáfico extrusivo, subaquático, teria originado os komatiitos do Grupo Quebra Osso. Em seguida, a bacia vulcão-sedimentar evoluiu para um estágio de deposição com intenso vulcanismo subaquático, predominantemente máfico e subordinadamente ultramáfico e intermediário a ácido, sedimentação vulcanoclástica, clástica e química do Grupo Nova Lima. A deposição do Grupo Nova Lima teria representado a principal fase de abertura e preenchimento da bacia, ainda sem indicar a existência de continentes siálicos. Somente a partir da sedimentação ortoquartzítica do Grupo Maquiné, fase final da evolução “greenstone belt”, é que se evidencia a existência e erosão de importantes áreas continentais graníticas vizinhas à bacia “greenstone belt”.

Ainda segundo Schorchers (1992), não são encontradas rochas graníticas intrusivas no “greenstone belt” Rio das Velhas, e os contatos com os domos tonalíticos-trondhjemíticos-granodioríticos (TTG) são tectônicos, milonitizados, e localmente hidrotermalizados a metassomatizados. As rochas presentes indicam apenas uma fase de metamorfismo regional, compatível com o evento Proterozóico, Minas/Espinhaço.

3.2. Mineralizações

A distribuição temporal dos depósitos de ouro do Brasil e principalmente no Quadrilátero Ferrífero demonstra que a maioria desses depósitos foi formada durante o Arqueano e o Paleoproterozóico, com um pequeno número gerado durante o Neoproterozóico e alguns raros casos durante o Paleozóico e Mesozóico. Entretanto, um importante número de depósitos secundários formou-se durante o Cenozóico devido à reciclagem erosional e ao enriquecimento supérigeno (Hartmann et al, 2001).

As mineralizações auríferas do Quadrilátero Ferrífero podem ser agrupadas conforme as idades das rochas hospedeiras, e subdivididas conforme a natureza das rochas e os tipos de mineralizações encontradas:

1- Hospedados em rochas Arqueanas.

Encontrados nas rochas do Supergrupo Rio das Velhas, associam-se principalmente a formações ferríferas bandadas metamorfizadas (mais ou menos *chert ferruginoso*) e em uma unidade de origem hidrotermal, conhecida como Lapa Seca. O estilo predominante das mineralizações é o *stratabound*, e subordinadamente ocorrem veios de quartzo concordantes e/ou discordantes com a foliação principal. Segundo Lobato et al. (2001) e

Thorman et al. (2001), os principais depósitos que se enquadram nessa classificação são: Morro Velho, Bicalho, Bela Fama, Cuiabá, Raposo e São Bento.

Depósitos relativamente pequenos ocorrem associados a rochas maficas e ultramáficas, em veios quartzo-carbonatados (Depósito Juca Vieira), e em rochas clásticas e vulcânoclásticas (Depósito Córrego do Sítio).

2- Hospedados em rochas Proterozóicas.

Encontrados em diversos litotipos e estruturas geológicas da região, constituem depósitos secundários localizados em rochas conglomeráticas paleoproterozóicas do Supergrupo Minas (aluviais em placers, Depósito Moeda), ou depósitos localizados em formações ferríferas do tipo Lake Superior (Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas). Os tipos morfogenéticos veios de quartzo e hematita discordantes e/ou concordantes.

Ocorrências também são conhecidas no contato tectônico entre o Supergrupo Rio das Velhas e o Grupo Itabira, chamado por Contato Mineralizador Principal, na região de Ouro Preto (Chauvet et al. 1994); e em quartzitos, siltitos e filitos carbonosos (Membro Morro do Ouro, Formação Paracatu, Grupo Canastra), que também hospedam mineralizações em veios de quartzo (Depósito Morro do Ouro), porém formados e rotacionados durante o evento Neoproterozóico denominado Ciclo Brasiliano.

3- Hospedados em coberturas sedimentares Cenozóicas.

Formados pela erosão, transporte, deposição e acúmulo de partículas de ouro, principalmente pela gravidade, depositadas preferencialmente em sedimentos conglomeráticos, nas “proximidades” de rochas que podem portar mineralizações primárias.

Os principais depósitos de ouro presentes demonstram que as mineralizações auríferas estão condicionadas principalmente a metalotectos litológicos, mineralógicos e estruturais, sendo que na maioria dos casos pelo menos dois destes controles atuam concomitantemente, quando não três.

Segundo (Pereira et al., 2007) estudos isotópicos de chumbo para depósitos do tipo “Lode”, indicam que o principal evento mineralizador na região ocorreu entre 2.8 a 2.7 Ga. Chauvet et al. (1994), sugerem que grande parte das ocorrências de ouro em veios de quartzo foi remobilizada durante a atividade hidrotermal relacionada ao Ciclo Brasiliano.

4. Matérias e Métodos: Revisão Conceitual

A reanálise geofísica regional por métodos magnéticos e gamaespectrométricos, via “softwares” mais robustos e inferências geofísicas adicionais, e pelo avanço do conhecimento geológico sobre a região, provavelmente permitirá um refinamento e uma

reinterpretação das anomalias já conhecidas, e eventualmente a detecção de outras não conhecidas e de menor intensidade, resultando em possíveis melhorias no modelo exploratório para ouro e ferro na região.

4.1. Campo Magnético da Terra

Segundo Blakely (1996), Carl Friederich Gauss em 1998 foi o primeiro a descrever o campo magnético terrestre, também conhecido como geomagnético. Em seus trabalhos, chegou à conclusão que o campo observado na superfície do planeta era totalmente gerado em seu interior; entretanto sabe-se atualmente que uma pequena parte deste origina-se na porção externa do planeta, causado por fontes crustais.

Em estudos geomagnéticos, o campo pode ser dividido em vetores quantitativos, descritos em termos de três componentes ortogonais em um sistema de coordenadas cartesianas, usualmente orientado com "x" para norte, "y" para leste e "z" para baixo, conforme pode ser observado na Figura 03; expressado na unidade nT (nano tesla).

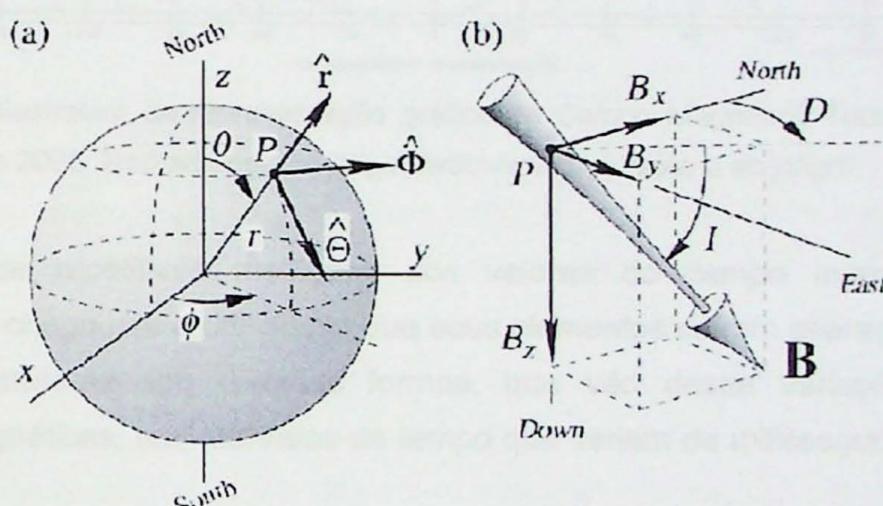


Figura 03: Ilustração do vetor campo magnético total (\mathbf{B}) e seus componentes, horizontais: B_x e B_y , e vertical: B_z , onde (I) é o ângulo de inclinação do vetor \mathbf{B} com a horizontal, considerado positivo quando inclinado para baixo do plano horizontal, e negativo quando inclinado para acima do plano horizontal. A declinação (D) é o azimute da projeção horizontal do vetor (\mathbf{B}), considerado positiva para leste e negativa para oeste. Retirado de Blakely. (1996).

Então, a intensidade do campo magnético total pode ser representada como:

$$T^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2$$

Para facilitar e universalizar sua utilização, foi criada através de acordos internacionais uma representação gráfica e matemática do campo magnético total de todo o planeta, conhecida como *International Geomagnetic Reference Field – IGRF*, Figura 04.

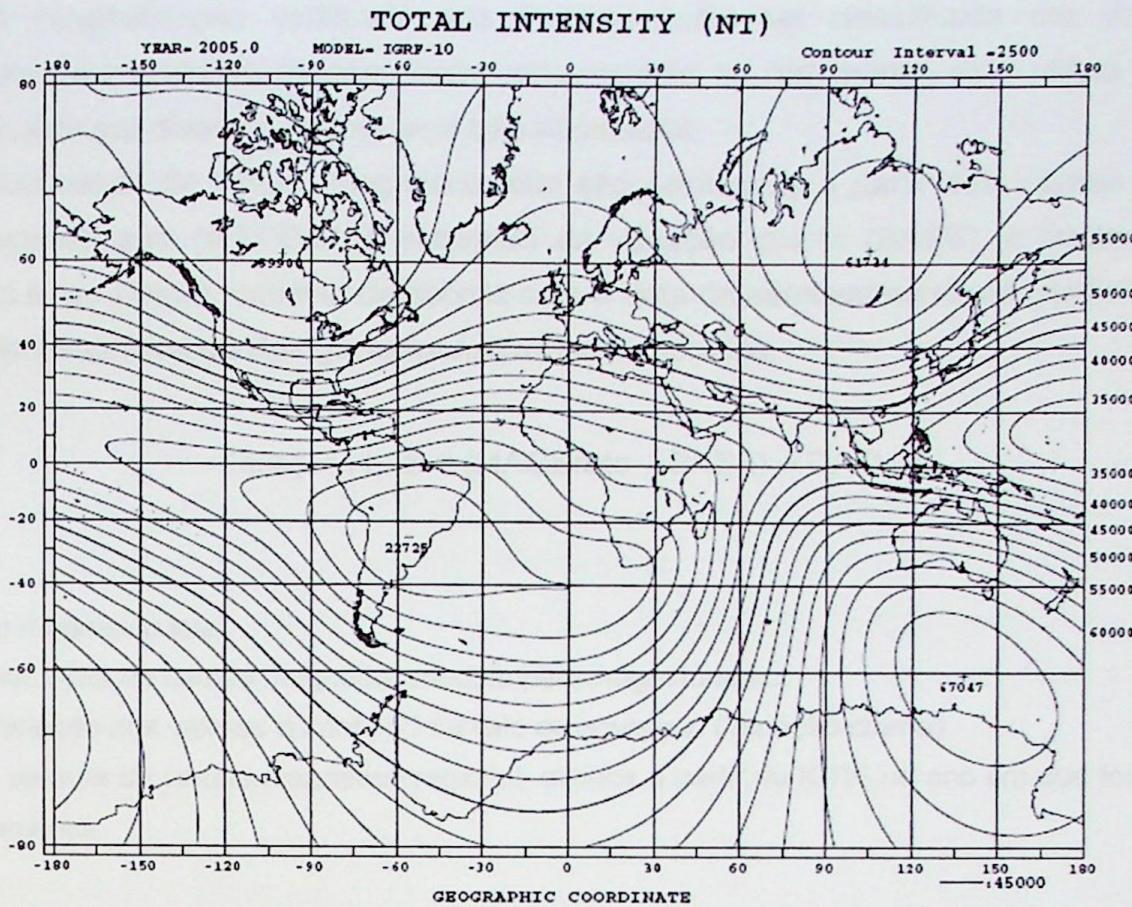


Figura 04: Figura ilustrativa da representação gráfica do Campo Magnético Total da Terra, IGRF, referente ao ano de 2005. Retirada do site: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/>.

Através de repetitivas medições dos valores do campo magnético total em localidades fixas, chegou-se a conclusão que seus elementos sofrem alterações ao longo do tempo, manifestando-se sob diversas formas, que vão desde variações diurnas até tempestades magnéticas, em intervalos de tempo que variam de milissegundos até milhões de anos.

Longos períodos de variações ocorrem primariamente devido a modificações no fluido do núcleo externo, essas alterações são conhecidas como variações magnéticas seculares (*secular geomagnetic variations*).

Como o valor do campo é variável com o tempo a “*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*” (IAGA) adota um novo modelo “IGRF” em intervalos de cinco anos, conhecidos como épocas.

4.1.2. AeroMagnetometria

Método geofísico que mede a magnetização das rochas como resultado da presença de minerais magnéticos em sua composição, principalmente magnetita, pirrotita e ilmenita; possibilitando a localização de mineralizações desde que associadas aos minerais anteriormente citados, como também a identificação de feições geológicas como contatos, falhas, dobras e zonas de cisalhamentos.

A magnetização verificada nos litotipos pode ser classificada em dois tipos, magnetização induzida e magnetização remanecente ou remanente, esta ultima podendo ser produzida por diversos fatores aqui não abordados.

Anomalias do campo magnético total são calculadas a partir dos valores medidos pelo magnetômetro (MAGBruto), subtraído da variação diurna (BASE), e posteriormente somadas a um Datum, variável de acordo com a data do aerolevantamento geofísico e com a posição geográfica da litologia responsável pela anomalia.

$$\text{Equação (1): } B = (\text{MAGBruto} - \text{BASE}) + \text{DATUM}$$

onde:

B: campo magnético total.

MAGBruto: Valor do campo magnético medido pelo magnetômetro.

BASE: Variação dos valores durante o intervalo de aquisição (variação diurna).

DATUM: valores do campo magnético regional, obtidos a partir do IGRF no ano em que foi realizado o levantamento.

Após esse cálculo, diversos outros podem ser realizados para a obtenção de demais produtos. Por exemplo, a primeira derivada (cálculo da componente vertical do campo) pode ser obtida através de equações matemáticas utilizadas para transformar/dividir a anomalia do campo magnético total em diversos componentes, isolando-se a componente de interesse, no caso Bz. As imagens geradas a partir dessa transformação são utilizadas em pesquisa mineral predominantemente para mapear lineamentos magnéticos e estruturas rasas que ocorrem nas regiões aerolevantadas. Já o sinal analítico é formado pelo gradiente vertical e horizontal da anomalia, e é dependente apenas da posição geográfica dos corpos litológicos, não sendo influenciado pela direção de magnetização dos corpos (Blakely, 1996). Os diversos cálculos e transformações matemáticas utilizados para a geração desses produtos não foram explicadas em vista de suas complexidades.

4. 1. 3. Aerogamaespectrometria

É uma técnica rápida e efetiva para o mapeamento geoquímico de elementos radioativos, urânio, tório e potássio, presentes nas rochas ou solos da região pesquisada. É capaz de refletir variações geoquímicas desses elementos nos primeiros 30 – 35cm da superfície, e contribuir com informações acerca da diversidade litológica através da variação da concentração desses radioelementos. Também fornece informações a respeito de processos mineralizadores com zonas de alteração hidrotermal associadas, onde a concentração original desses elementos foi modificada, produzindo consequentemente comportamentos distintos aos esperados.

Para cada radioelemento é atribuída uma cor, ou seja, o elemento potássio (K) é usualmente representado nos mapas temáticos geofísicos de contagens radiométricas ternárias pela cor vermelha, o elemento tório (Th) pela cor verde, e o elemento urânio (U) pela cor azul. Conseqüentemente, rochas graníticas, que geralmente possuem altas contagens de todos esses elementos são representadas com a cor branca ou cores avermelhadas, enquanto rochas básicas/ultrabásicas (máficas/ultrabásicas), com baixos valores radiométricos associados, são caracterizadas por cores escuras, ou preto.

4. 2. Software Utilizado

O software *Oasis Montaj* 7.0, Figura 5, é uma ferramenta de processamento e geração de imagens e mapas utilizada na exploração mineral, tanto no setor de mineração como em óleo e gás. O pacote do software inclui funções importantes como importação de dados, processamento, visualização e elaboração de mapas, além de avançadas opções de gridagem e plotagem.

Como principais parâmetros de entrada o programa utiliza: coordenadas X, Y e Z para cada ponto onde o valor do campo magnético foi medido, os valores do campo obtidos pelo magnetômetro (MAGBruto), a variação diurna (BASE), o valor do campo obtido a partir do *datum* (IGRF) e as datas da realização das aquisições. Posteriormente, os valores reais do campo magnético são calculados através da equação (1), demonstrada anteriormente, e a partir destes valores diversas outras transformações, não especificadas neste trabalho, são realizadas.

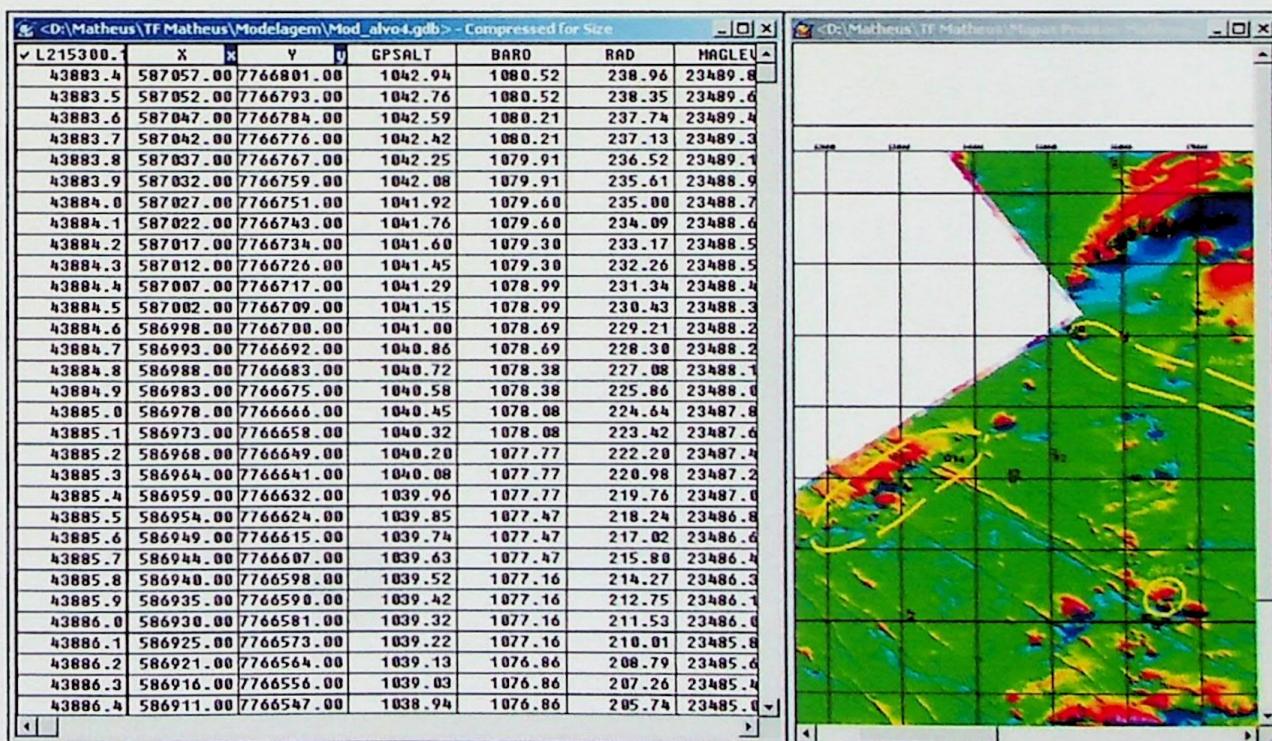


Figura 5: Imagem ilustrativa da interface do software *Oasis Montaj* 7.0. Lado esquerdo da figura a base de dados (data base), e lado direito o mapa geológico do campo magnético total.

5. Apresentação dos Dados Geofísicos

As informações produzidas pelo reprocessamento dos dados magnéticos e gamaespectrométricos estão apresentadas abaixo sob a forma de Figuras (06 – geológico; 07 – campo magnético total, 08 – sinal analítico; 09 – primeira derivada e 10 - ternário) e mapas geofísicos, anexos ao trabalho.

Em prospecção mineral esses mapas são de fundamental importância para os trabalhos de seleção e hierarquização das áreas alvo, elegidas principalmente pela intensidade e dimensões de suas anomalias; além é claro pelo conhecimento geológico da região, litologias, estruturas, metamorfismo, ocorrências minerais e outras informações. A integração de todo o conteúdo citado, permitiu a escolha de quatro alvos exploratórios apresentados mais adiante.

Os processamentos geofísicos necessários para a confecção dos mapas temáticos foi realizado pela empresa Reconsult, co-orientadora do projeto.

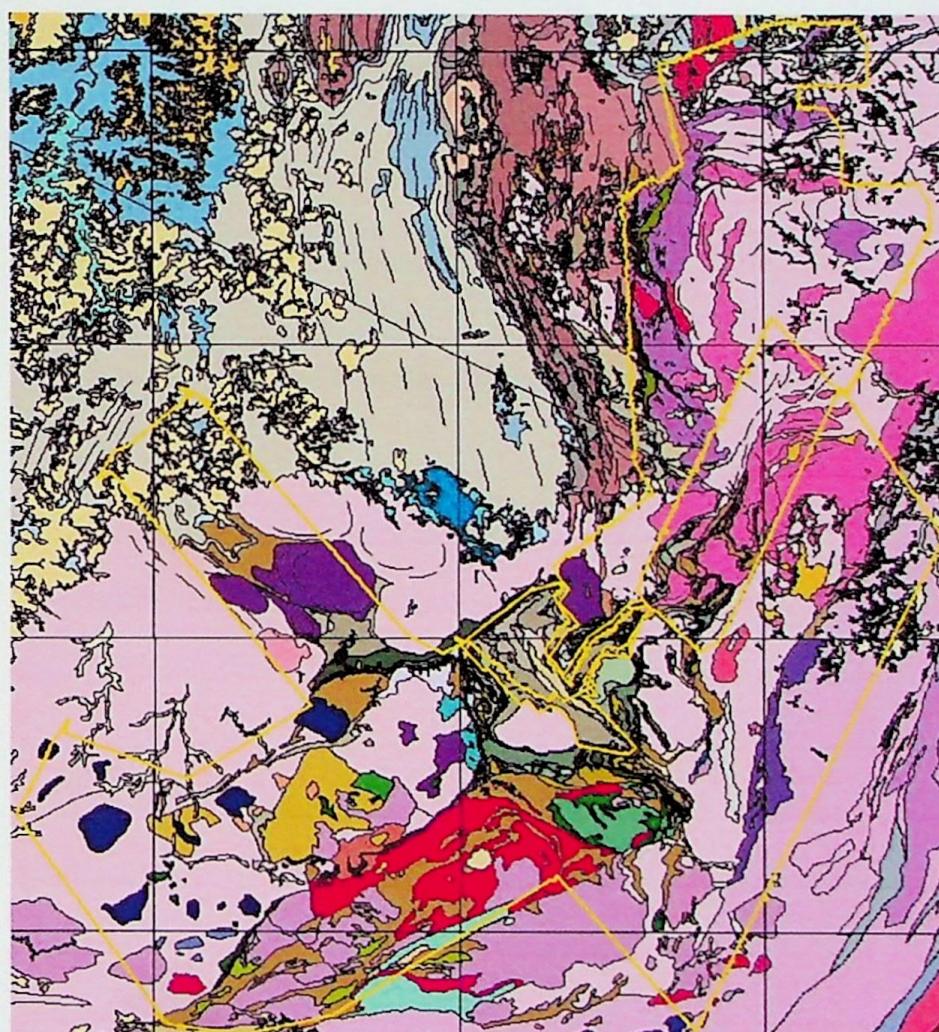


Figura 06: Mapa geológico ilustrativo da área total abrangida pelos levantamentos aerogeofísicos da Codemig - Programas 2001 – Áreas 2 e 3; e CPRM - Programa Rio das Velhas (3007).

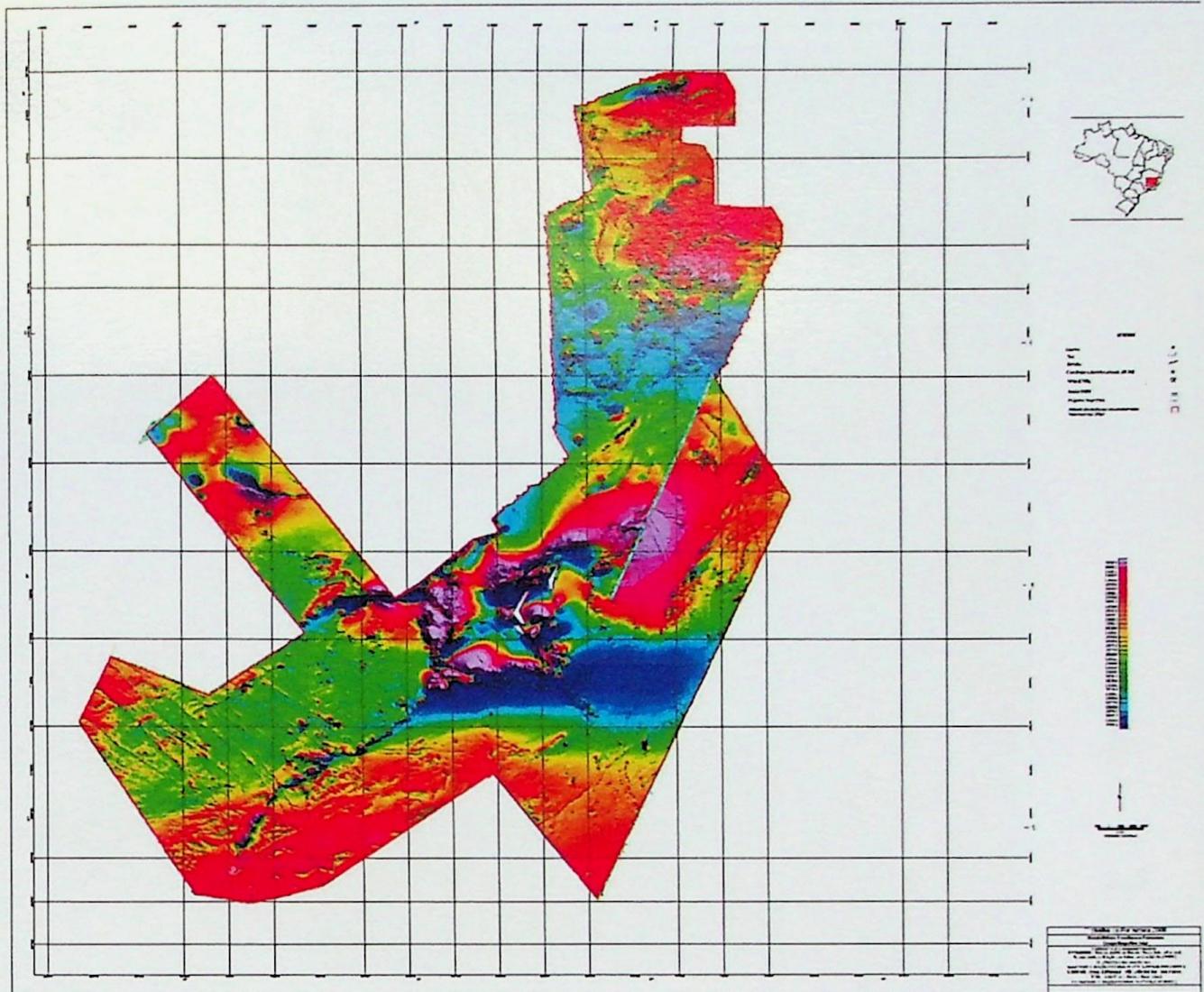


Figura 07: Mapa ilustrativo do campo magnético total das áreas.

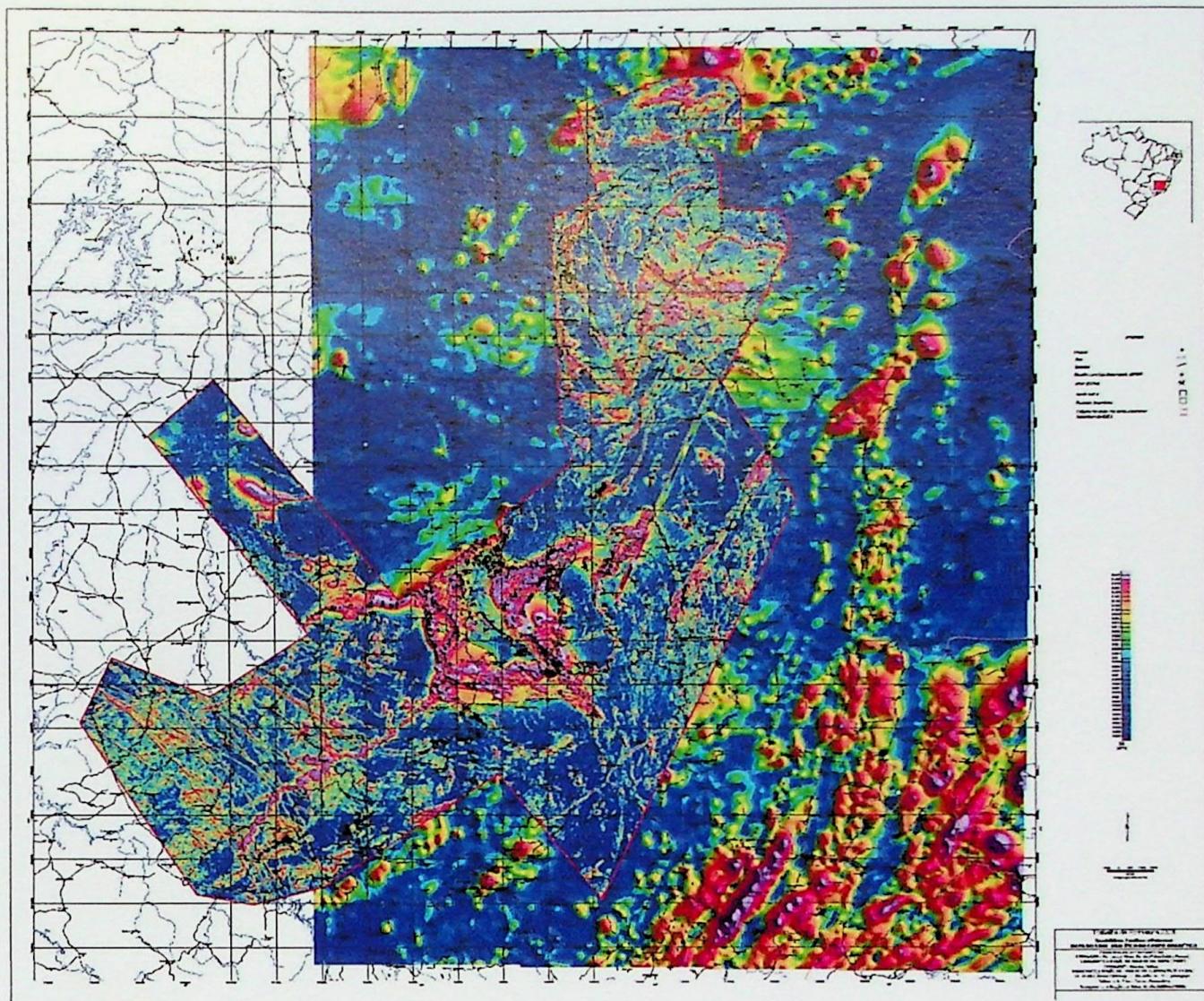


Figura 08: Mapa ilustrativo do sinal analítico do campo magnético total das áreas.

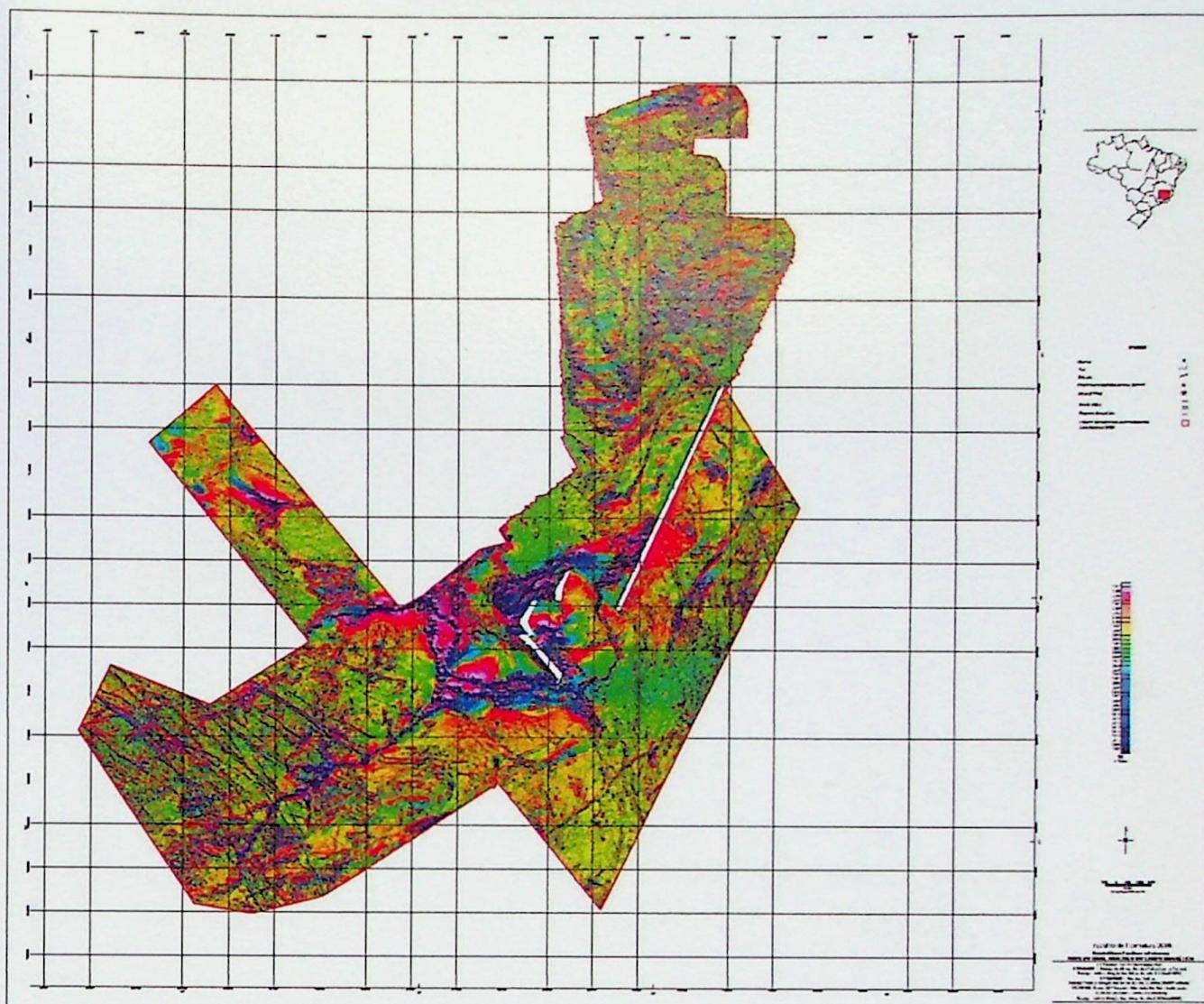


Figura 09: Mapa ilustrativo da primeira derivada do campo magnético total das áreas.

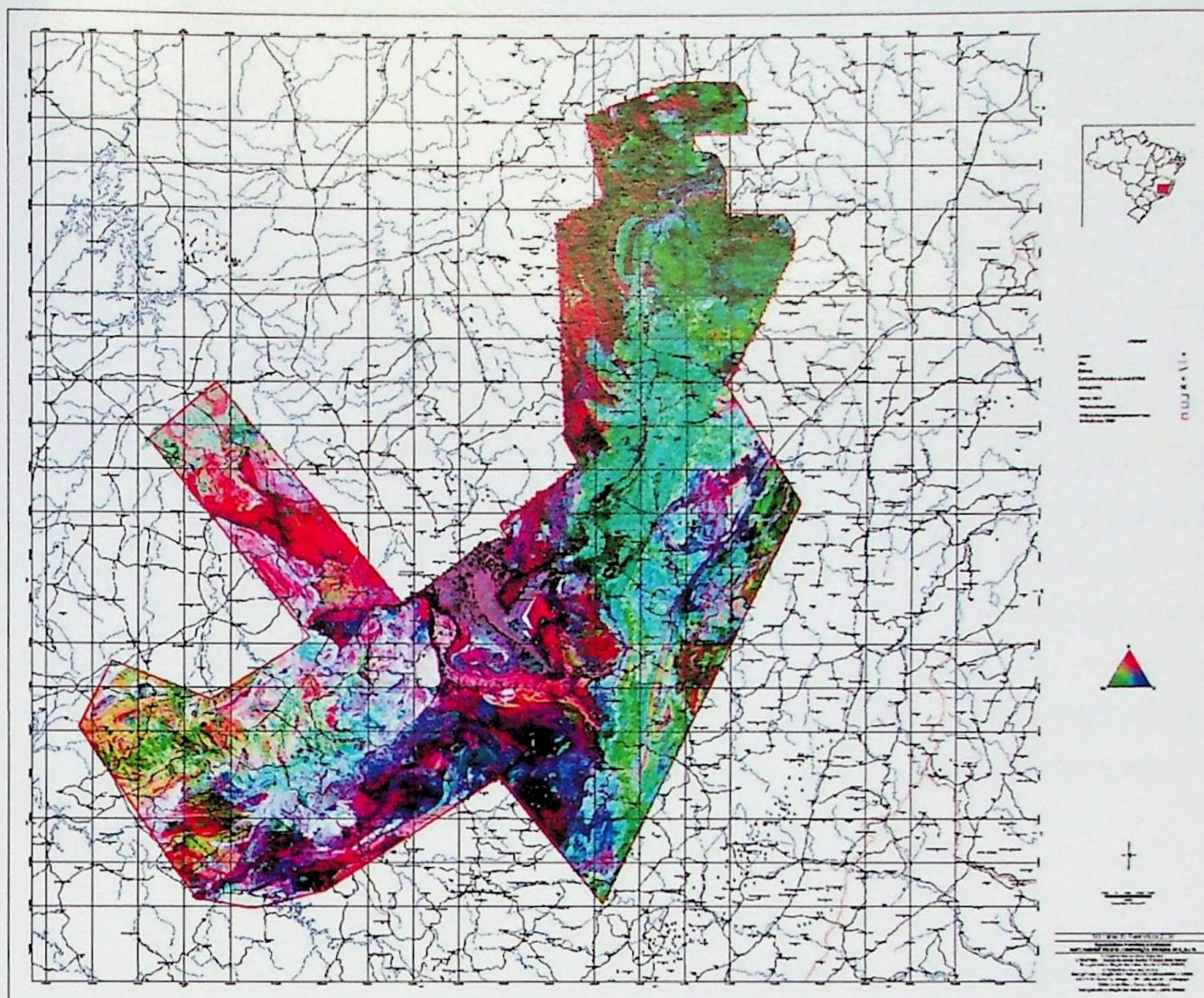


Figura 10: Mapa ilustrativo da composição radiométrica ternária das áreas, U (azul) – Th (verde) – K (vermelho).

6. Seleção dos Alvos Exploratórios

A partir de todas estas informações, foi possível selecionar localidades de interesse a prospecção mineral de ouro e principalmente ferro, uma vez que os insumos em foco no trabalho possuem características peculiares que possibilitam associações diretas ou indiretas com os mapas temáticos geofísicos obtidos. Entretanto, é importante esclarecer que apenas a presença de uma anomalia não implica necessariamente que o alvo se tornará um depósito mineral, mesmo possuindo características geológicas e geofísicas que lhes favoreçam a respeito de serem mineralizadas.

Para o caso dos bens minerais estudados aqui, os produtos geofísicos possuem respostas satisfatórias, sobretudo para o do ferro. Mineralizações de ferro estão diretamente relacionadas à presença de minerais magnéticos, predominantemente magnetita, e são facilmente observáveis através dos mapas geofísicos do campo magnético total e sinal analítico do campo magnético total. Já os mapas de contagens radiométricas ternárias são úteis para o “mapeamento” dos litotipos presentes na região, uma vez que formações ferríferas, principais rochas formadoras de depósitos de ferro, devem possuir baixos valores

radiométricos associados devido à ausência de minerais constituídos pelos elementos urânio, tório e potássio. Conseqüentemente, a correlação anomalias magnéticas com baixas contagens radiométricas ternárias e o contexto geológico das áreas resultou na escolha de alvos exploratórios para a pesquisa de ferro.

Para o tipo de depósito aurífero de interesse no trabalho, tipo Lode, as respostas geofísicas são utilizadas principalmente como associações indiretas da provável presença da mineralização. Para selecionar os pontos usou-se a correlação formações ferríferas bandadas retrabalhadas por zonas de cisalhamentos. Essa característica pode ser facilmente observada em mapas magnéticos do campo total, primeira derivada e do sinal analítico. Também aqui, os dados de contagens radiométricas ternárias são úteis, pois a verificação que essas anomalias magnéticas com baixas contagens ternárias associadas, apresentam-se recortadas por lineamentos magnéticos que podem ser representativos de zonas cisalhantes, e a observação que estas “shear zones” elevam os valores radiométricos no interior do corpo, justifica a escolha dos alvos, uma vez que em seu interior possivelmente ocorreram remobilizações e concentrações de elementos, gerando zonas de alterações hidrotermais, principalmente sericitização, constantemente observadas em depósitos auríferos do tipo.

Alvo 1

Basicamente, o alvo localizado na parte oeste do Quadrilátero Ferrífero, Figura 11, foi selecionado por se tratar de uma possível continuidade das rochas pertencentes ao Supergrupo Minas, ocorrentes mais a NW do alvo segundo os mapas geológicos da CPRM. Nos produtos geofísicos, Figuras 12, 13 e 14; podem ser observadas diversas anomalias magnéticas associadas ao alvo, provavelmente decorrentes da presença de litotipos deste supergrupo. Entretanto, nem todas são mapeadas como BIFs ou como outras litologias que apresentariam tal comportamento, aparecendo nos mapas geológicos como embasamento granítico-gnaissico arqueano. Essa região também correlaciona-se a baixas contagens radiométricas, Figura 15, reiterando a provável presença de rochas máficas\ultramáficas no local. Outro importante aspecto para a escolha dessa área é a presença de importantes feições/lineamentos magnéticos.

Devido a todas estas características, este alvo é favorável à descoberta de mineralizações de ouro e principalmente ferro.



Figura 11: Mapa geológico ilustrativo com todos os alvos exploratórios e pontos realizados.

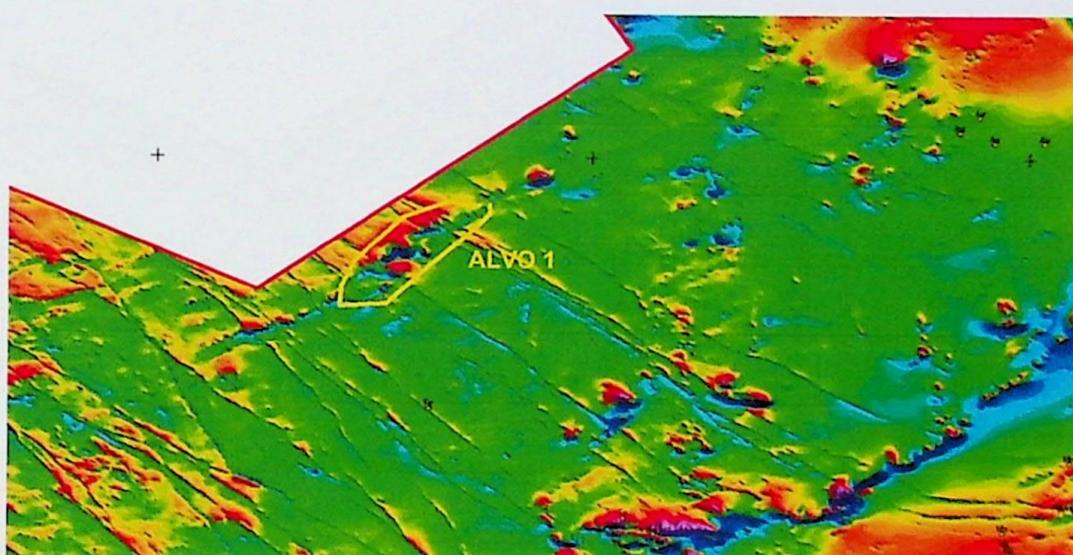


Figura 12: Mapa do campo magnético total com o alvo exploratório 1.

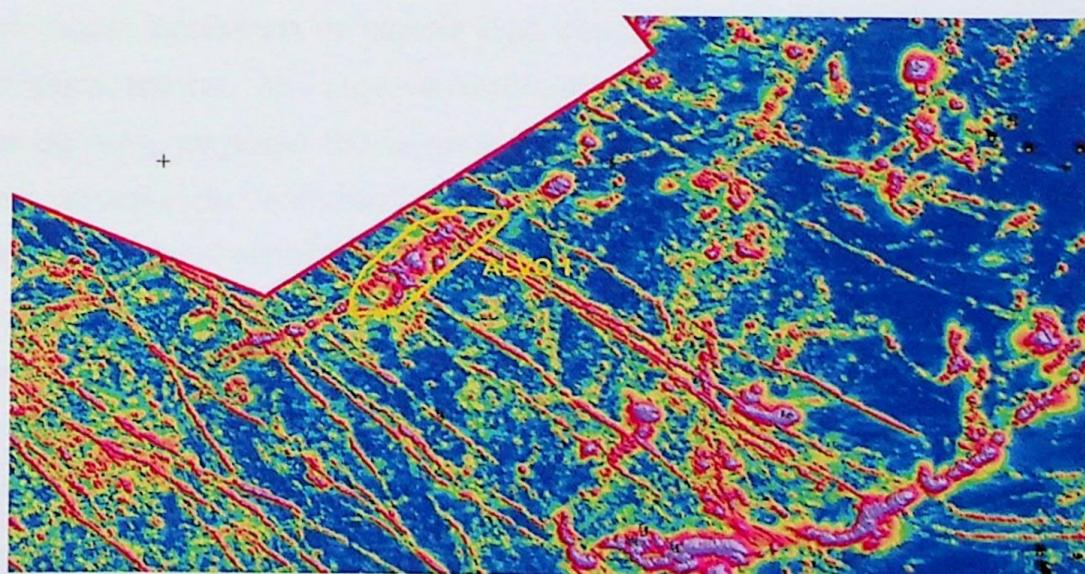


Figura 13: Mapa do sinal analítico do campo magnético total com o alvo exploratório 1.

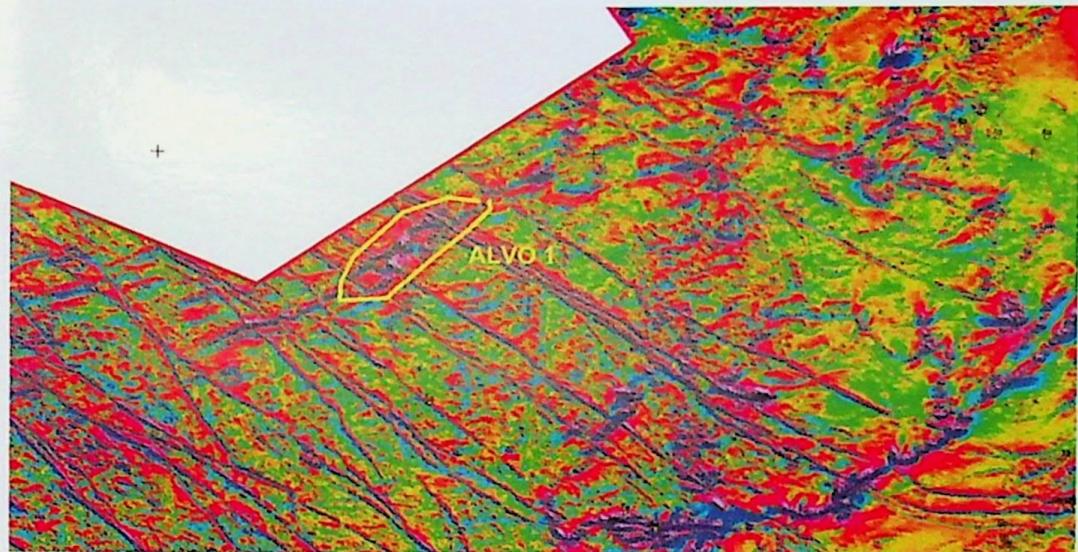


Figura 14: Mapa da primeira derivada do campo magnético total com o alvo exploratório 1.

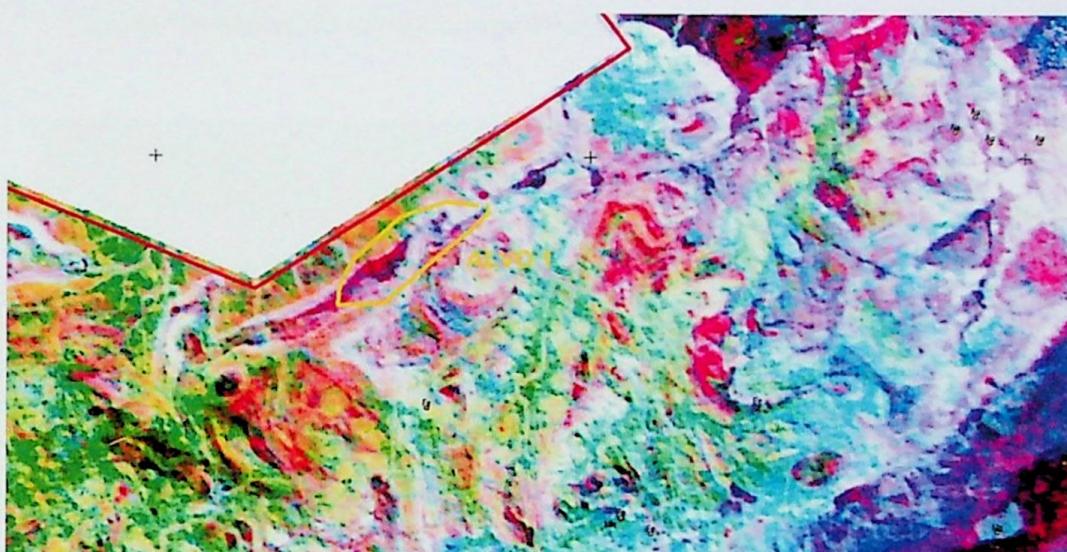


Figura 15: Mapa ternário com o alvo exploratório 1.

Alvo 2

Representa um provável prolongamento de um lineamento magnético inferido através dos mapas geofísicos do campo total, sinal analítico e primeira derivada; Figuras 16, 17 e 18, respectivamente. Ao longo da feição, com direção NW-SE, estão inseridas diversas ocorrências de ouro, segundo folhas geológicas da CPRM. Essas ocorrências concentram-se na parte sudeste da “estrutura” e o seu prolongamento é aqui sugerido através da observação da sua possível continuidade para a direção NW da área.

Na parte sudeste da “estrutura” pode ser facilmente observado através da imagem da contagem radiométrica ternária do alvo, Figura 19, que a região associa-se a baixas contagens radiométricas e que próximo à feição há enriquecimento de potássio, indicando provavelmente a presença de uma zona de alteração hidrotermal com enriquecimento de potássio.

Esse alvo é favorável principalmente a mineralização de ouro.

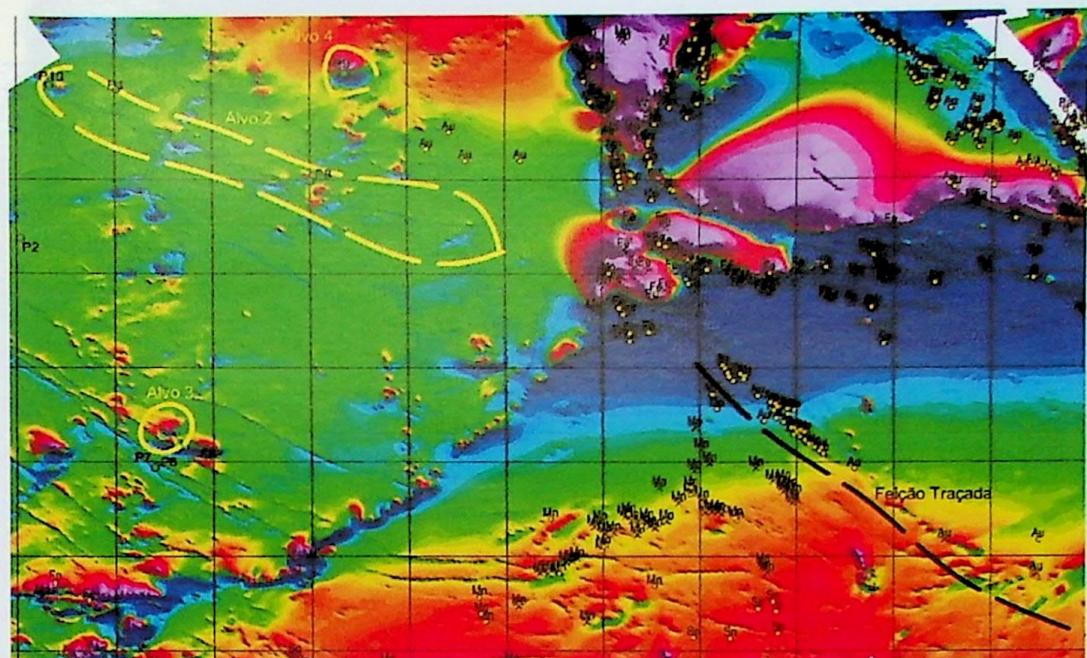


Figura 16: Mapa do campo magnético total com o alvo exploratório 2.

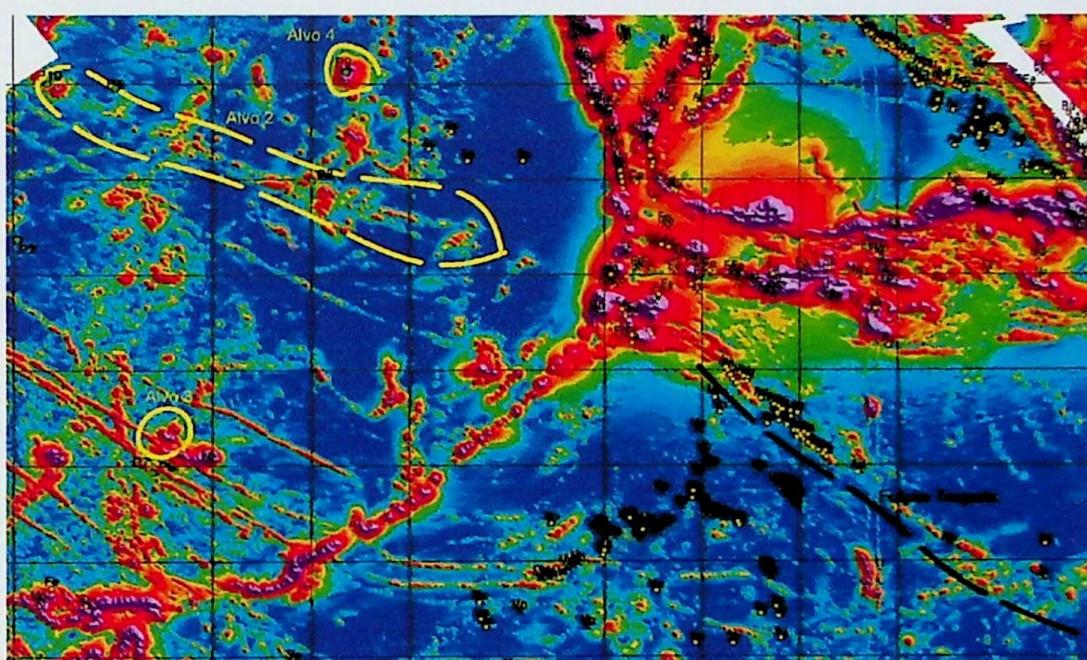


Figura 17: Mapa do sinal analítico do campo magnético total com o alvo exploratório 2.

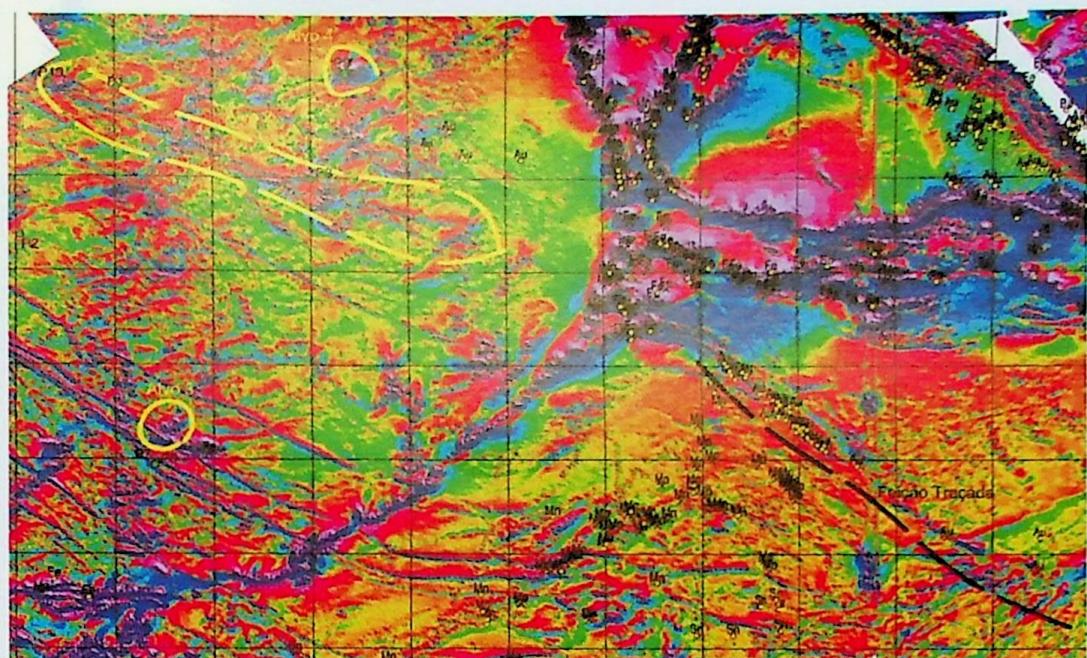


Figura 18: Mapa da primeira derivada do campo magnético total com o alvo exploratório 2.

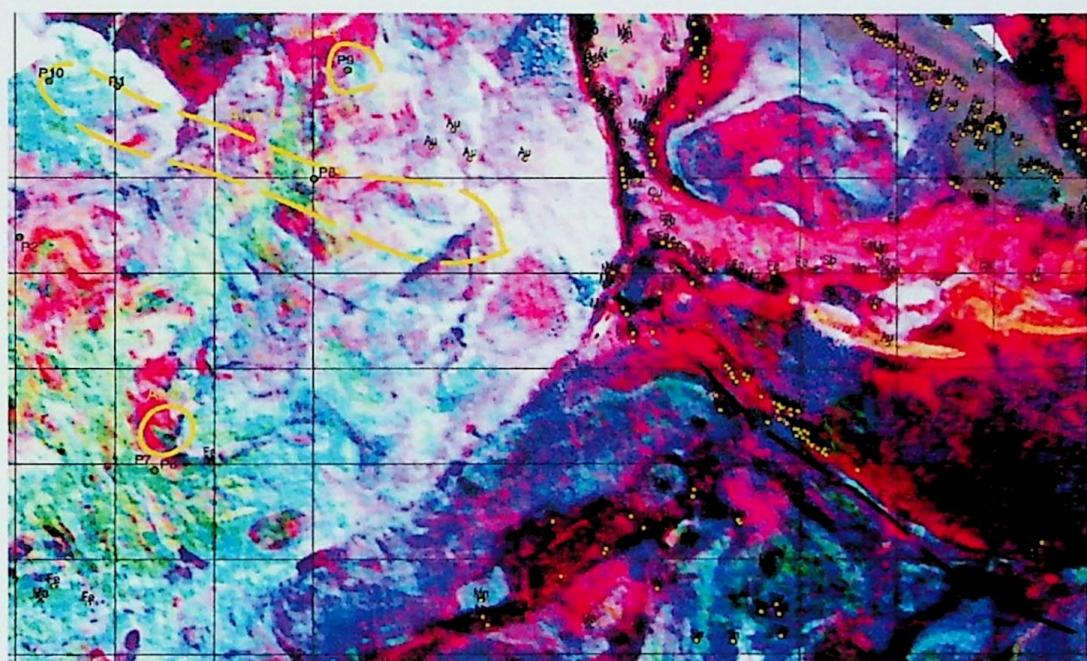


Figura 19: Mapa ternário com o alvo exploratório 2.

Alvo 3

O alvo apresenta-se de forma muito similar ao primeiro, ou seja, anomalias magnéticas (Figuras 20, 21 e 22) correlacionadas a contagens radiométricas ternárias relativamente baixas, Figura 23; entretanto mapeadas, segundo folhas da CPRM, como rochas granito-gnaíssicas do embasamento arqueano. Também apresenta abundantes lineamentos magnéticos recortando o alvo.

Esse alvo é favorável à descoberta de mineralizações de ouro e principalmente ferro.

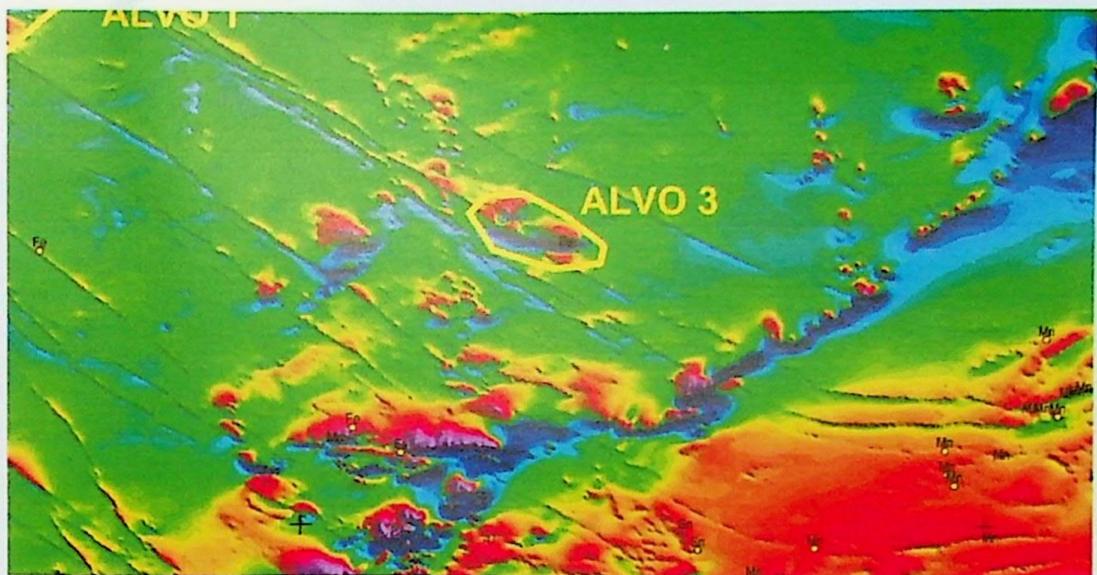


Figura 20: Mapa do campo magnético total com o alvo exploratório 3.

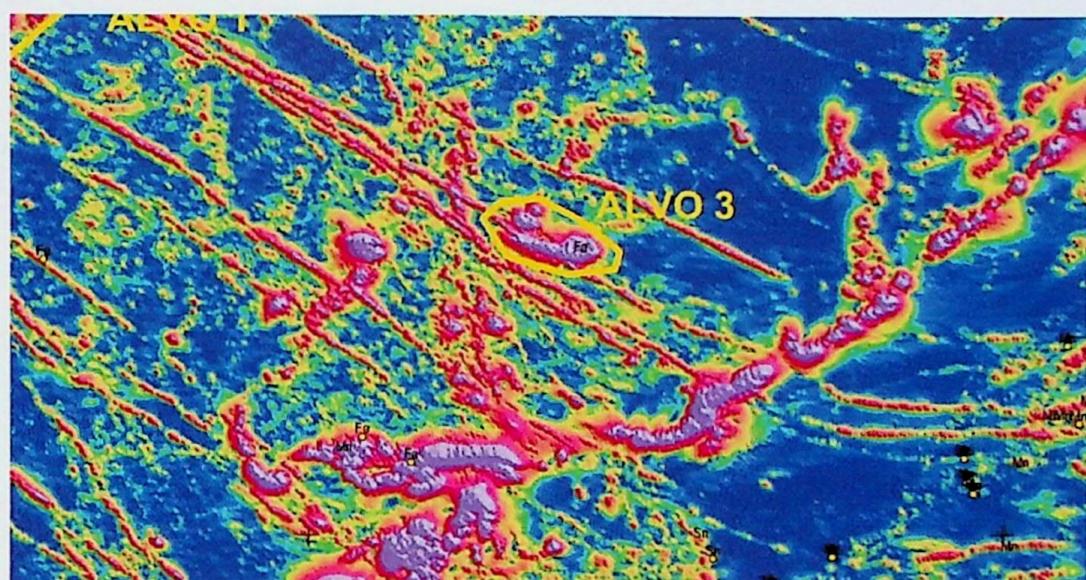


Figura 21: Mapa do sinal analítico do campo magnético total com o alvo exploratório 3.

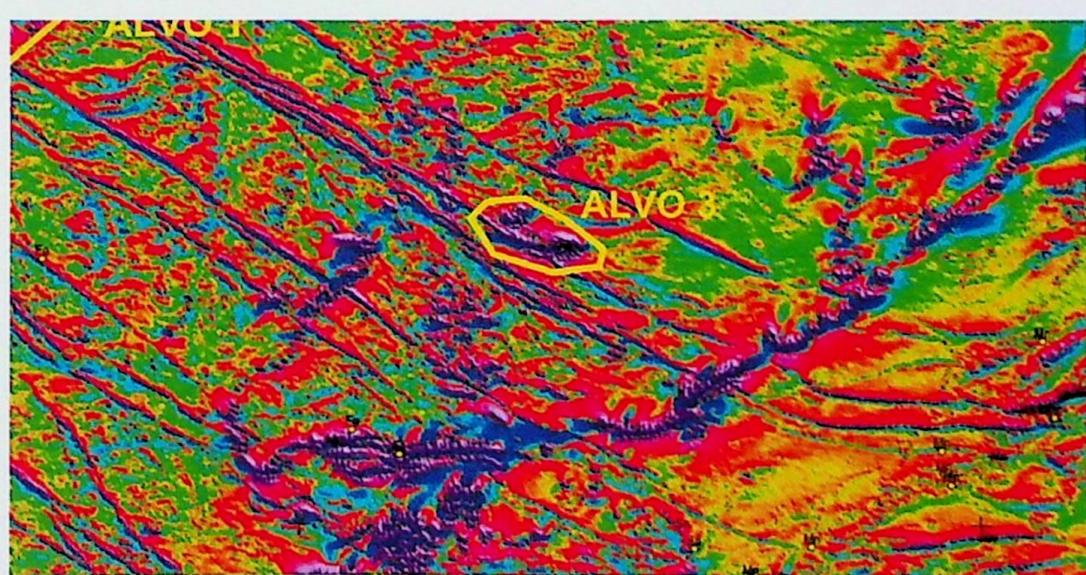


Figura 22: Mapa da primeira derivada do campo magnético total com o alvo exploratório 3.



Figura 23: Mapa ternário com o alvo exploratório 3.

Alvo 4

O último e principal alvo selecionado é representado por uma anomalia magnética com aproximadamente dois quilômetros de diâmetro, claramente observada nos dados geofísicos do campo magnético total, sinal analítico e primeira derivada, Figuras 24, 25 e 26, respectivamente. O alvo não correlaciona-se a baixas contagens radiométricas ternárias, Figura 27, apresentando comportamento similar ao esperado para as rochas graníticas-gnaíssicas arqueanas do embasamento.

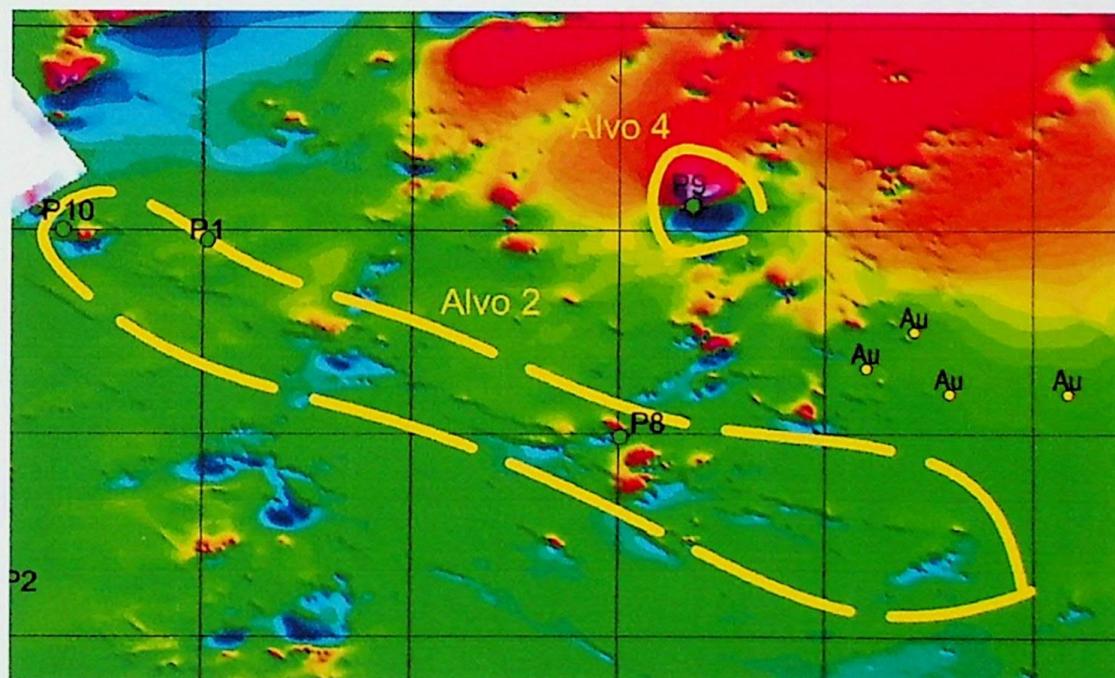


Figura 24: Mapa do campo magnético total com o alvo exploratório 4.

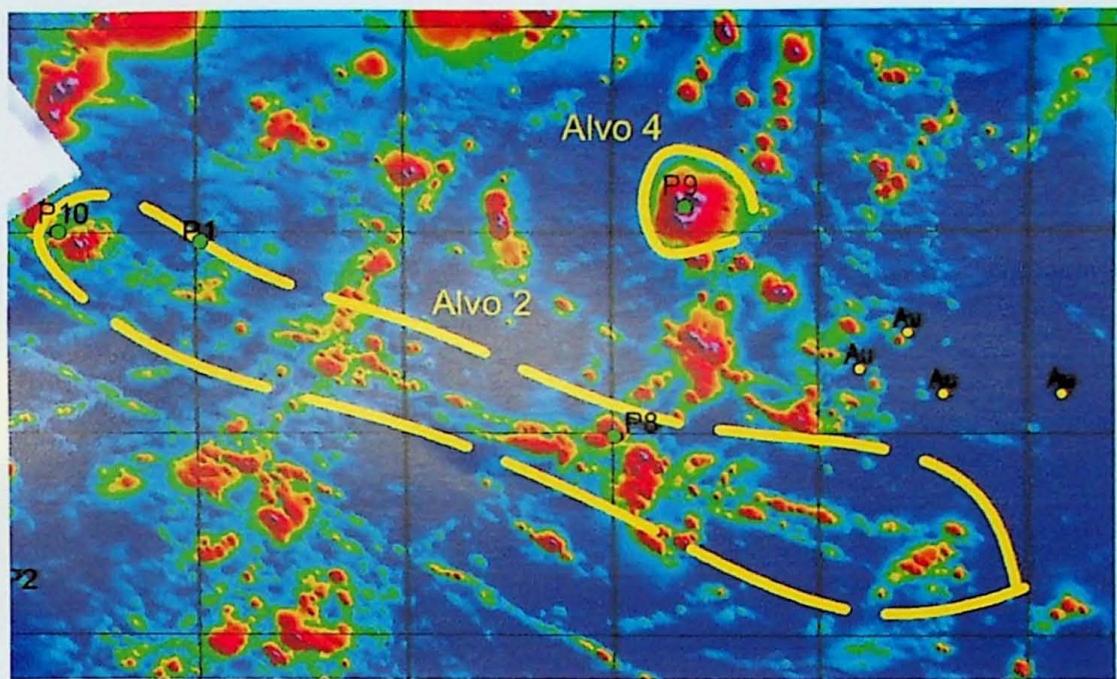


Figura 25: Mapa do sinal analítico do campo magnético total com o alvo exploratório 4.

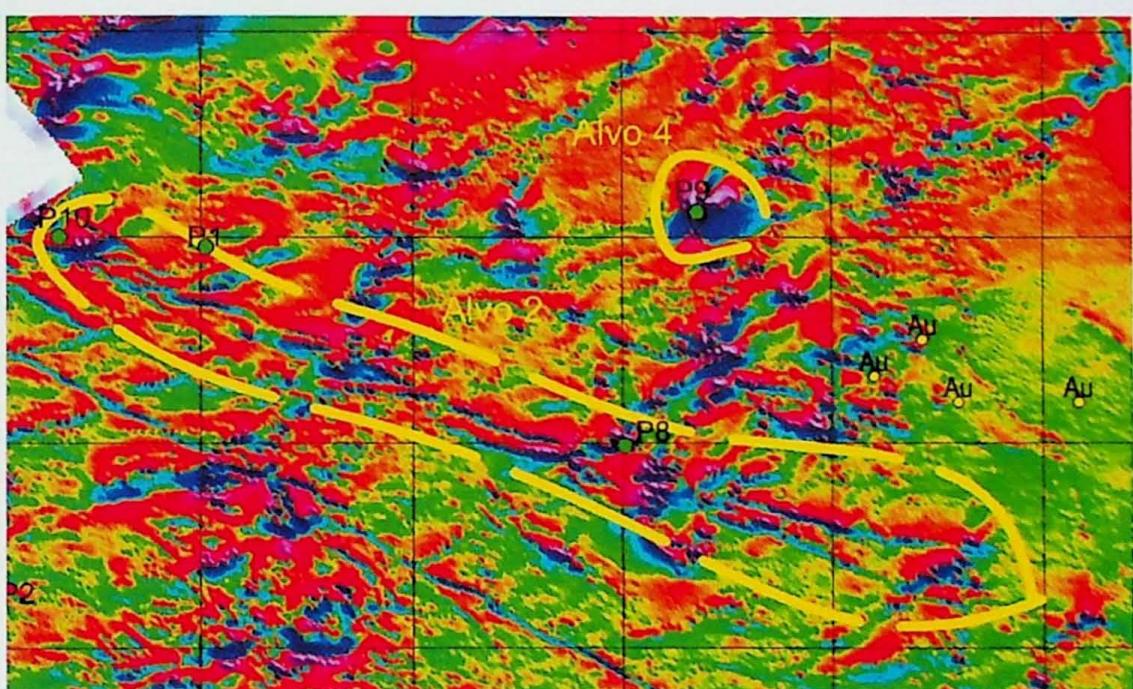


Figura 26: Mapa da primeira derivada do campo magnético total com o alvo exploratório 4.

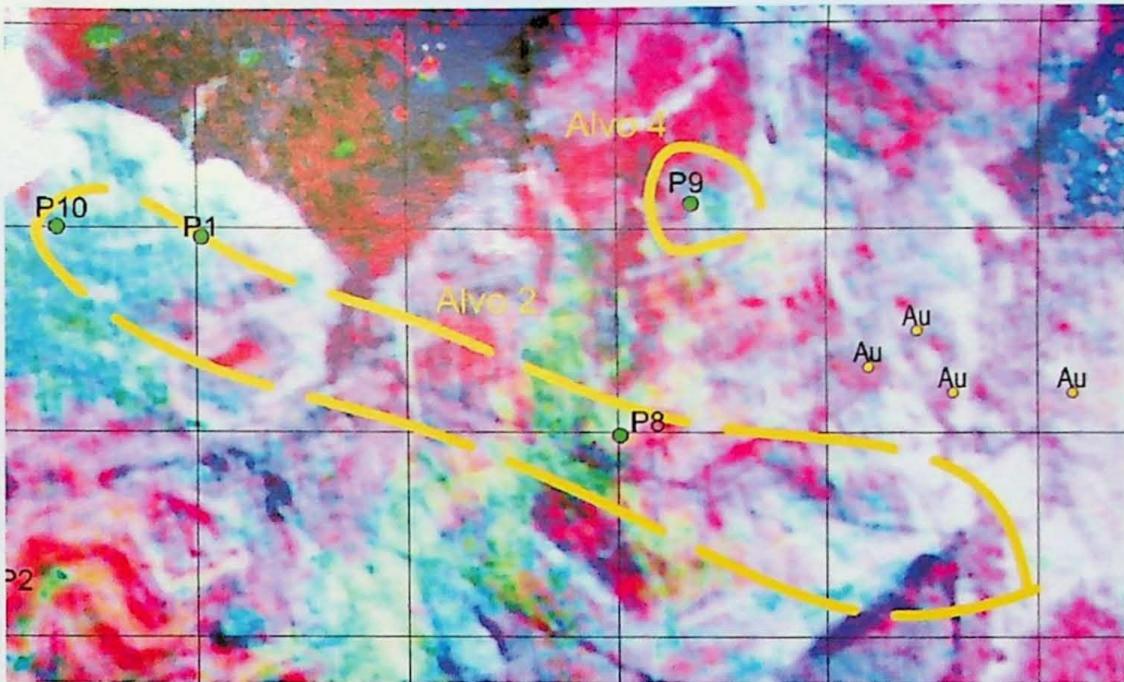


Figura 27: Mapa ternário com o alvo exploratório 4.

7. Verificação “in situ” das Anomalias

Durante os dias 19, 20 e 21 de setembro foi realizado um trabalho de campo para a verificação “in situ” dos alvos pré-selecionados. O principal objetivo era a verificação e coleta de amostras dos litotipos que poderiam ser responsáveis pelas anomalias presentes, no caso dos alvos exploratórios para ferro; e a tentativa de observação de feições geológicas, tais como diques maficos, veios com magnetita e etc, que pudessem representar os lineamentos magnéticos com direção NW que cortam grande parte da área estudada. Durante os três dias de trabalho foram realizados um total de dez pontos, observados na Figura 28, abaixo.

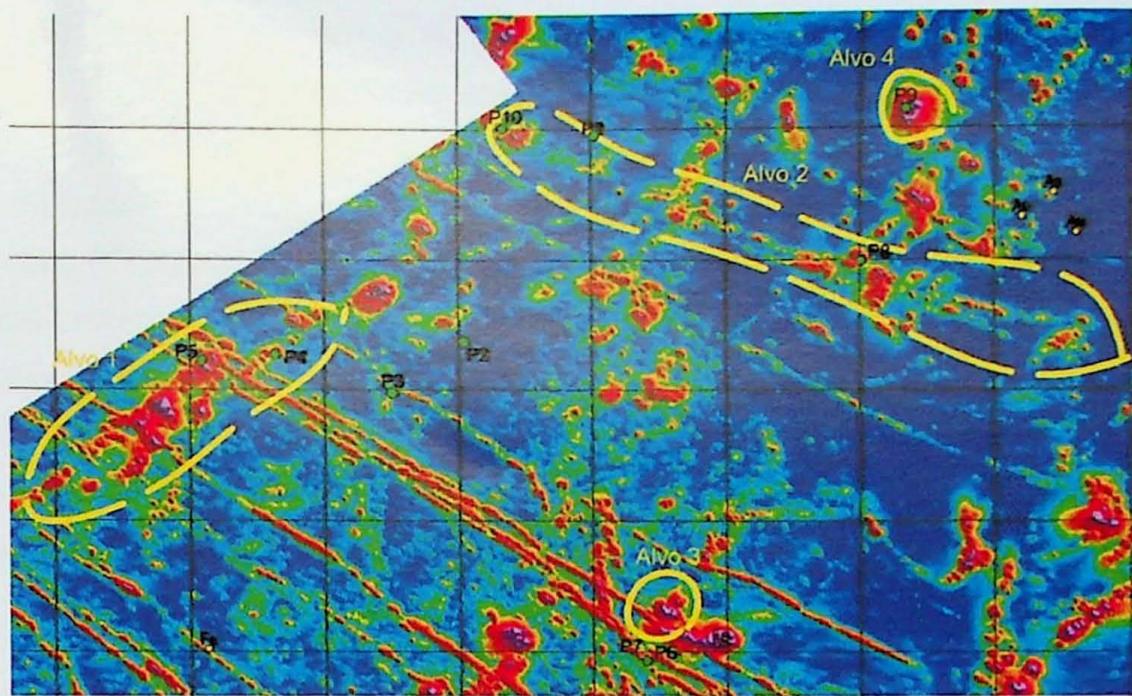


Figura 28: Imagem ilustrativa do sinal analítico do campo total com todos os alvos exploratórios (circulados em amarelo) e pontos realizados (verdes) no trabalho de verificação de campo.

1º Dia (19/09/2008)

No primeiro dia de trabalho foram realizados quatro pontos no total, dois para reconhecimento regional e dois para chegar litotipos e feições geológicas nos alvos. Os três primeiros pontos realizados concentram-se ao longo da rodovia BR 381 - Fernão Dias, sentido São Paulo capital, como pode ser observado na Figura 29.

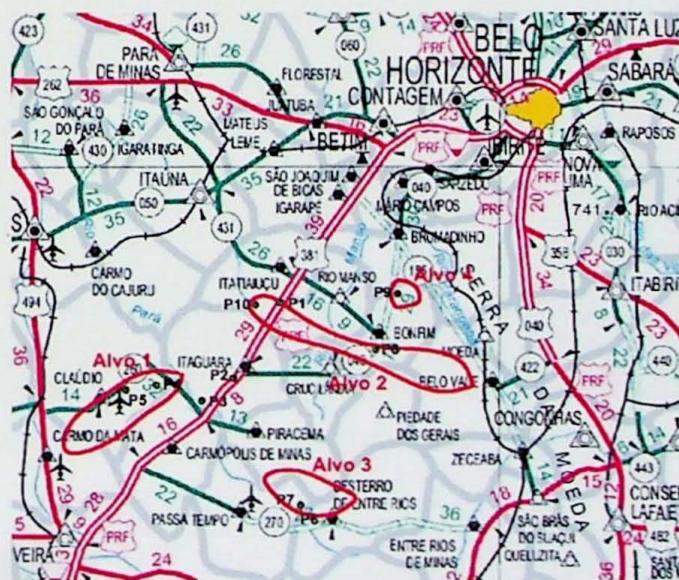


Figura 29: Imagem ilustrativa do mapa rodoviário de Minas Gerais com a localização dos alvos exploratórios e todos os pontos realizados.

No primeiro ponto, GPS: 0560224 x 7759554, foi observada uma rocha quartzo-feldspática bandada muito alterada, de composição granodiorítica-tonalítica, formada por bandas compostas predominantemente por quartzo e feldspato, com textura granoblástica de granulação média; e por bandas compostas por quartzo, feldspato e biotita, com textura

lépido-granoblástica de granulação fina-média. Cristais de muscovita, com até 2,5cm de comprimento, foram freqüentemente observados espalhados pelo chão do afloramento, porém não encontrados "in situ" na litologia. A litologia aflorante assemelha-se muito às rochas descritas como pertencentes ao embasamento tonalítico-trondjemítico-granodiorítico (TTG) arqueano da região.

Nas redondezas do afloramento também são freqüentes fragmentos de quartzo com brilho vítreo oleoso e textura sacaróide, provavelmente proveniente de veios. No ponto número dois, GPS: 0550388 x 7743732, foi observada a mesma rocha descrita no ponto anterior, porém neste a rocha de composição tonalítica apresentava menor proporção de cristais de biotita, cerca de 3% (Figura 30). Junto ao afloramento foram observados matacões rolados de formações ferríferas bandadas, Figura 31.



Figura 30: rocha quartzo-feldspática bandada com biotita, muito alterada. Ponto 2.



Figura 31: Matacões rolados de formações ferríferas bandadas encontradas próximas ao afloramento do ponto 2.

O ponto número três foi realizado com o intuito de se verificar feições ou evidências geológicas que pudessem caracterizar os lineamentos magnéticos observados nos mapas temáticos geofísicos. Novamente, a litologia descrita encontrava-se muito alterada, e assemelhava-se muito às rochas anteriormente descritas como biotita gnaisses migmatitos pertencentes ao embasamento. Não foram descritos diques básicos, corpos gabroídes, minerais estirados, zonas de cisalhamentos, veios ou qualquer outra “feição” geológica que justifique a presença do lineamento magnético.

Para se ter acesso ao ponto quatro deve-se seguir pela rodovia BR-381, sentido São Paulo capital, até o trevo que dá acesso a cidade de Cláudio e posteriormente seguir pela rodovia MG-260. Deve-se prosseguir por essa até atravessar uma ponte sobre um riacho, após atravessá-la entrar na segunda estrada de terra do lado esquerdo, cerca de 1 Km após a ponte.

O quarto e principal ponto do dia (GPS: 0536326 x 7742743) localiza-se no interior do alvo exploratório número um e sua realização tinha os mesmos objetivos descritos para os pontos anteriores. Não foram observadas rochas aflorantes, e apenas localmente observaram-se blocos rolados de uma rocha composta exclusivamente por quartzo, com textura sacaróide de granulação média-grossa, provavelmente proveniente de veios.

2º Dia (20/10/2008)

Durante o segundo dia de trabalho foram realizados mais três pontos, todos com os mesmos objetivos descritos anteriormente.

Para se ter acesso a primeira parada do dia, ponto cinco (GPS: 0530858 x 7742183), deve-se seguir o mesmo procedimento adotado para se ter acesso ao ponto quatro. Esse ponto também foi realizado no interior do alvo exploratório número um. Dessa vez foi encontrada a mesma rocha quartzo-feldspática bandada pertencente ao embasamento TTG arqueano, Figura 32; porém também foram observados escassos blocos de canga ferruginosa e formações ferríferas nas proximidades do ponto, fato que pode sugerir a provável presença de rochas ricas em ferro em profundidades mais elevadas.



Figura 32: Rocha quartzo-feldspática bandada que ocorre no ponto 5.

Para se ter acesso ao ponto número seis e sete, deve seguir pela rodovia BR-381, sentido São Paulo capital, até o trevo que dá acesso à rodovia MG-270, passar pela cidade de Passa Tempo e posteriormente seguir a caminho da cidade de Desterro de Entre Rios.

No ponto seis, GPS: 0563951 x 7719357, foi descrita a mesma rocha do embasamento verificada anteriormente, entretanto dessa vez com cristais de epidoto. No ponto sete, GPS: 0563953 x 7719356, também foi encontrado o embasamento tonalítico-trondjemítico-granodiorítico arqueano regional, Figura 33, e não foram observadas

litologias e feições geológicas que justifiquem a anomalia e os lineamentos magnéticos no local.



Figura 33: Matacões rolados da rocha quartzo-feldspática bandada pertencente ao embasamento.

3º Dia (21/10/2008)

No ultimo dia de trabalho de campo foram realizados três pontos (oito, nove e dez).

O acesso ao ponto oito, GPS: 0580095 x 7749863, localizado em um alto magnético dentro do alvo exploratório número dois, é feito partindo-se da cidade de Itaúna pela rodovia estadual MG-431 até a cidade de Bonfim, conforme pode ser observado na Figura 29.

O ponto localizado em um alto de morro não possui afloramentos, apenas blocos rolados do mesmo biotita gnaisse migmatítico e blocos de cangas ferruginosas, Figura 34.

INSTITUTO DE GEOCIÉNCIAS - USP

- BIBLIOTECA -

21598



Figura 34: Blocos de cangas ferruginosas encontradas no ponto oito, localizado no alvo exploratório número dois.

Para se ter acesso ao ponto nove, localizado no alvo exploratório quatro, deve seguir o mesmo procedimento adotado para o ponto anterior e posteriormente pegar estrada de terra sentido a cidade de Brumadinho. O ponto localiza-se a uma distância de aproximadamente 9 Km do ponto anterior, ao lado da rodovia.

Nesse ponto, GPS: 0583367 x 7761412, foi descrito um afloramento de formações ferríferas bandadas (itabiritos) bastante alterado, com cerca de oito metros de altura, observado nas Figuras 35, 36, 37 e 38.



Figura 35: Imagem do afloramento onde foram encontrados itabiritos alterados, com cerca de oito metros de altura. Ponto nove.



Figura 36: Imagem em maior detalhe da litologia observada no afloramento.

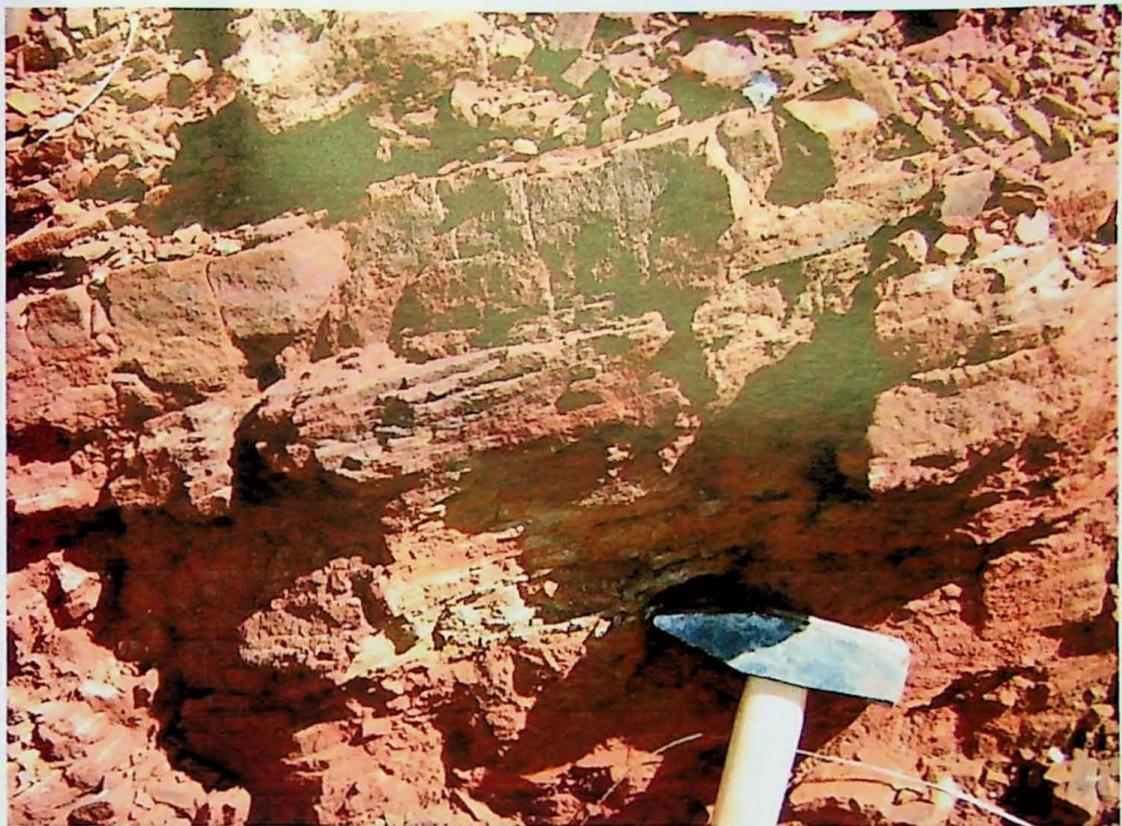


Figura 37: Imagem demonstrando níveis com diferentes porcentagens de óxidos de ferro no afloramento. O nível superior, mais enriquecido e com cor escura, apresenta claramente o bandamento composicional característico da rocha; enquanto o inferior, com cor clara e empobrecido em óxidos de ferro, é formado predominantemente por quartzo.



Figura 38: Imagem em detalhe da litologia encontrada no afloramento.

O último ponto do trabalho, ponto dez, foi novamente feito ao longo da rodovia BR-381 (Fernão Dias) sentido São Paulo capital, observar Figura 29, no interior do alvo exploratório número dois. O objetivo deste ponto era verificar feições geológicas que pudessem corresponder aos lineamentos magnéticos anteriormente citados.

Neste ponto, GPS: 0553070 x 7759684, observou-se um veio com aproximadamente três metros de altura, Figuras 39 e 40. É composto exclusivamente por cristais de quartzo, de granulação grossa, com textura sacaróide (Figura 41). Apresenta um nível muito alterado composto predominantemente por caulin e óxidos de ferro em seu interior, apresentado em detalhe na Figura 42.



Foto 39: Imagem do afloramento composto predominantemente por cristais de quartzo de granulação grossa, com textura sacaróide e intercalação de um nível predominantemente caulinítico (próximo ao martelo).



Figura 40: Imagem em maior detalhe do afloramento, demonstrando os níveis quartzosos e a intercalação caulinítica.



Figura 41: Imagem dos níveis quartzosos em detalhe. Observar textura sacaróide de granulação grossa.



Figura 42: Imagem em detalhe do nível composto predominantemente por caulim e óxidos de ferro, intercalado aos níveis quartzosos de granulação grossa.

No afloramento foram realizadas medidas da atitude do veio: 350°/20°, 04°/20° e 332°/20°; muito próximas à direção dos lineamentos magnéticos observados nos mapas geofísicos, entretanto não foram observados minerais magnéticos associados ao veio.

8. Modelagem Geofísica: *Model Vision*

A modelagem geofísica, realizada através do software *Model Vision*, para o alvo exploratório número quatro viabilizou-se a partir do momento que o trabalho de verificação “*in situ*” encontrou afloramentos de formações ferríferas bandadas (itabiritos) no local.

Para sua realização o software utiliza como principais parâmetros de entrada os seguintes dados: as coordenadas X, Y e Z dos dados aeromagnéticos, os valores já processados do campo, o modelo digital de terreno, os valores do IGRF, a declinação e a inclinação do campo, estes três últimos referentes à data de realização do aerolevantamento. A partir dela, Figura 43, foi possível obter informações como: a profundidade do corpo, sub-aflorante (5 a 10 metros), a extensão (aproximadamente 1500 metros) e a morfologia do corpo rochoso. Todas estas informações são muito importantes para se ter uma idéia mais clara de como é o corpo geológico responsável pela anomalia.

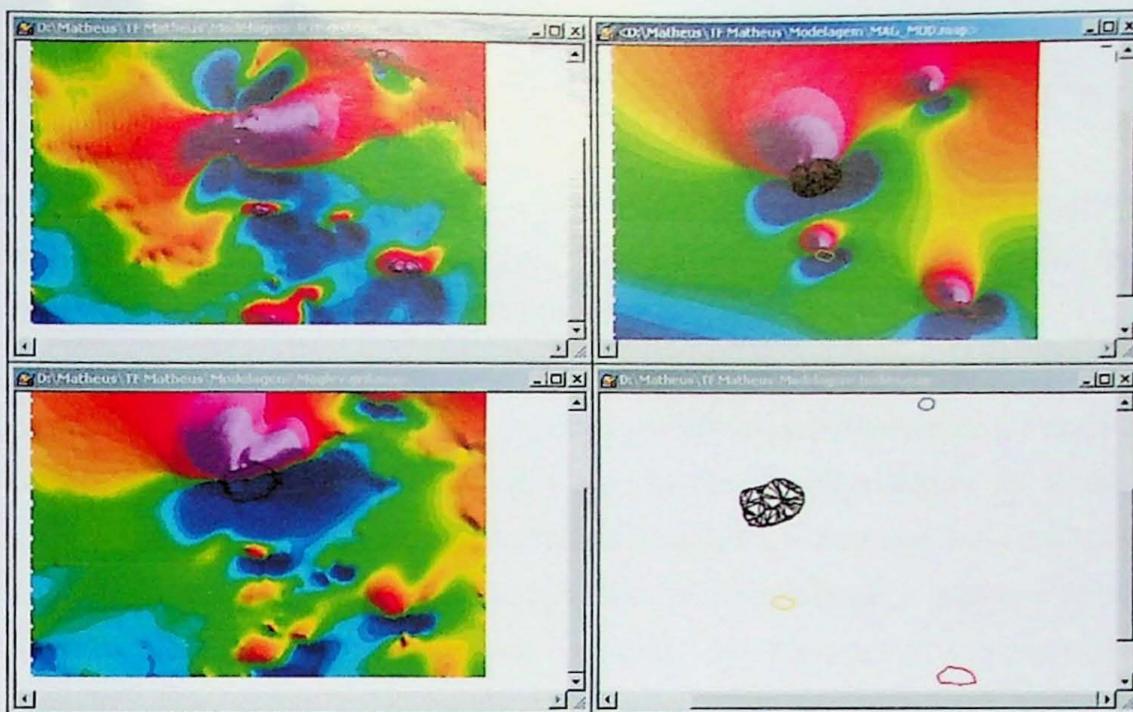


Figura 43: Interface da modelagem geofísica com o corpo rochoso modelado, alvo 4 (em preto), e as demais anomalias com seus respectivos corpos: azul (~400m) , amarelo (~500m) e vermelho (~1000m).

9. Discussão

De acordo com a bibliografia utilizada, a região pesquisada é predominantemente formada por granitóides, gnaisses migmatíticos e granulitos, parcialmente retrabalhados durante o Paleoproterozóico, por *greenstone belts* e rochas pertencentes ao Supergrupo Minas, como pode ser verificado na Figura 44.

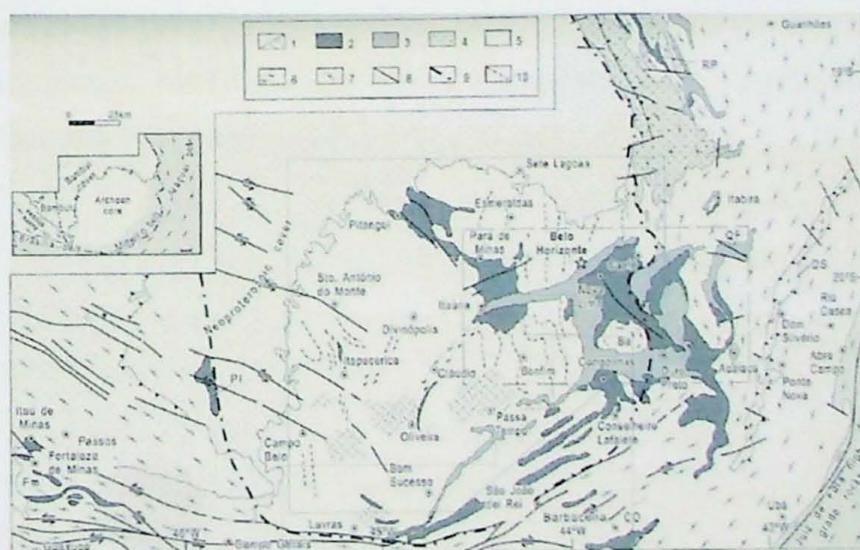


Figura 44: Mapa geológico da parte sudeste do Quadrilátero Ferrífero, demonstrando terrenos Arqueanos e Paleoproterozóico, assim como cinturões Neoproterozóicos. 1-Rochas graníticas, gnaisses migmatíticos e granulitos, parcialmente retrabalhados durante o Paleoproterozóico; 2- Greenstone Belts; 3-Supergrupo Minas; 4-Sistema Rifte Espinhaço; 5-Bambuí; 6-Shear Zones; 7- Estruturas Brasilianas; 8-Falhas mais importantes; 9-Limites cratônicos e 10-Foliação gnáissica. Retirado de Teixeira et al. (2001).

Mapas geológicos da região demonstram que nas localidades onde foram realizados os pontos de reconhecimento ocorrem predominantemente granitóides e gnaisses migmatíticos pertencentes ao embasamento arqueano, e apenas alguns pontos da área trabalhada seriam formados por rochas que fazem parte do Supergrupo Minas, associadas à anomalias magnéticas. Porém, em grande parte da área são observadas anomalias provavelmente não correlatas às rochas do embasamento.

Na parada número cinco, localizada no interior do alvo exploratório um, há ocorrências de rochas pertencentes ao Supergrupo Minas, representadas pelas litologias de cor cinza no quadrante esquerdo inferior da Figura 45, intercaladas ao embasamento arqueano. A região exibe claramente anomalias magnéticas diversas, até mesmo em locais dos mapas geológicos tidos como sendo formados por granitóides e gnaisses migmatíticos; além de também apresentam baixos valores de contagens radiométricas. Esse comportamento, anomalias magnéticas associadas a baixas contagens radiométricas, é geralmente característico de regiões constituídas por formações ferríferas ou por litologias básicas/ultrabásicas.

A paisagem observada no alvo exploratório número um, era formada predominantemente por pastos, com vegetação esparsa, localmente densa. Nas proximidades do ponto foram observados apenas afloramentos de rochas gnáissicas migmatíticas e, localmente, blocos rolados de formações ferríferas (itabiritos). Esses blocos de itabiritos podem então sugerir que no local ou em regiões sub-aflorantes, realmente ocorram litologias enriquecidas em ferro, de forma mais abundante que a demonstrada nos mapas geológicos. Essa afirmação pode ser feita graças às diversas outras anomalias magnéticas próximas ao ponto, não visitadas, porém localizadas no mesmo contexto e que em mapas geológicos também aparecem descritas como embasamento tonalítico-trondjemítico-granodiorítico regional.

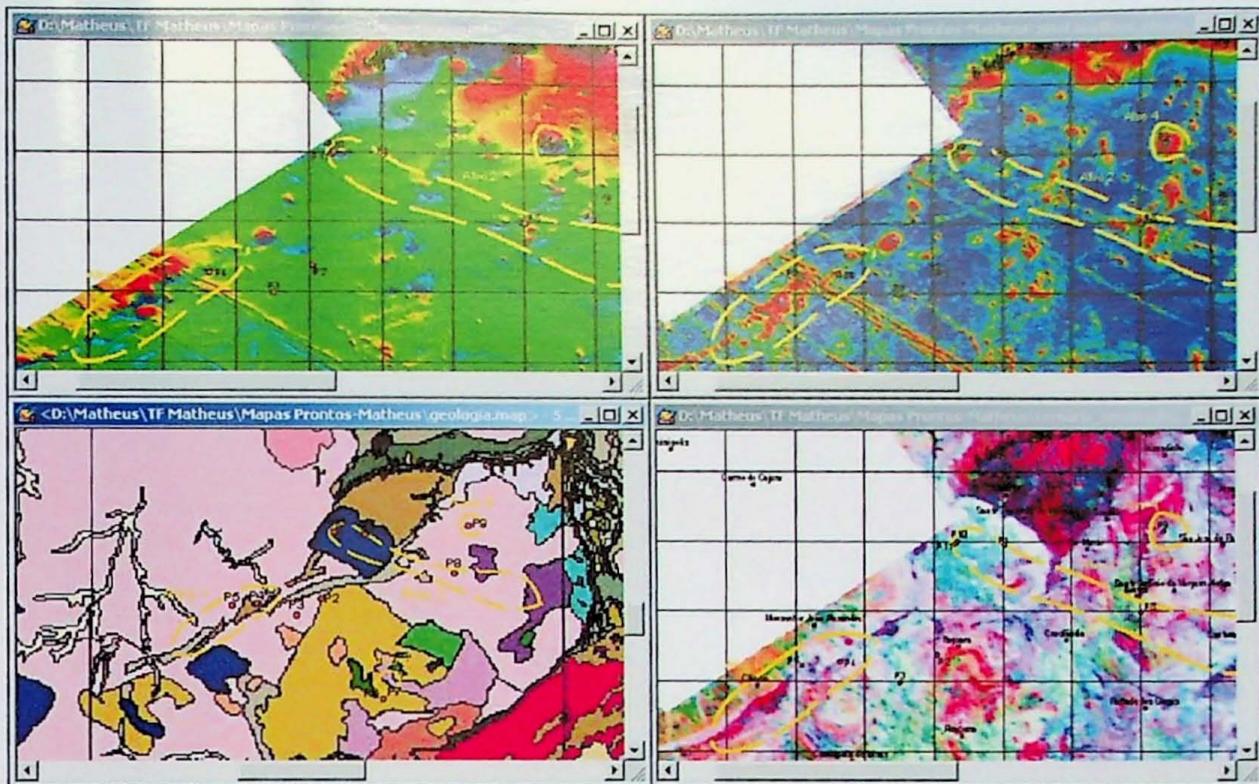


Figura 45: Imagem ilustrativa com os produtos geofísicos: campo magnético total, sinal analítico e contagem radiométrica ternária (quadrante superior esquerdo, superior direito e inferior direito, respectivamente), e o mapa geológico (quadrante inferior esquerdo); demonstrando a possível correlação dos litotipos do Supergrupo Minas (cor cinza) com as anomalias magnéticas e baixas contagens radiométricas presentes.

No caso dos pontos número oito e nove, localizados no interior dos alvos exploratórios dois e quatro respectivamente, observa-se claramente na Figura 46 que a região também é mapeada como granitóides e gnaisses migmatíticos (quadrante esquerdo inferior), entretanto a região associa-se à anomalias magnéticas (quadrantes superiores).

Durante a verificação das anomalias foram encontrados produtos e litotipos ferruginosos, cangas e itabiritos (apresentados anteriormente nas Figuras 34 e 38, respectivamente), demonstrando que esses pontos não são formados por rochas do embasamento, conforme descrito na literatura, e sim por formações ferríferas; fato que justifica a presença da anomalia na área.

Outro comportamento anômalo encontrado diz respeito às contagens radiométricas apresentadas nos mapas temáticos geofísicos, uma vez que formações ferríferas não deveriam possuir valores como os demonstrados pelo mapa de contagem radiométrica ternária. Essa característica é provavelmente decorrente da cobertura sedimentar, visto que as rochas encontram-se sub-aflorantes, aproximadamente 5 a 10 metros abaixo da superfície, conforme indica a modelagem geofísica realizada para o ponto número nove.

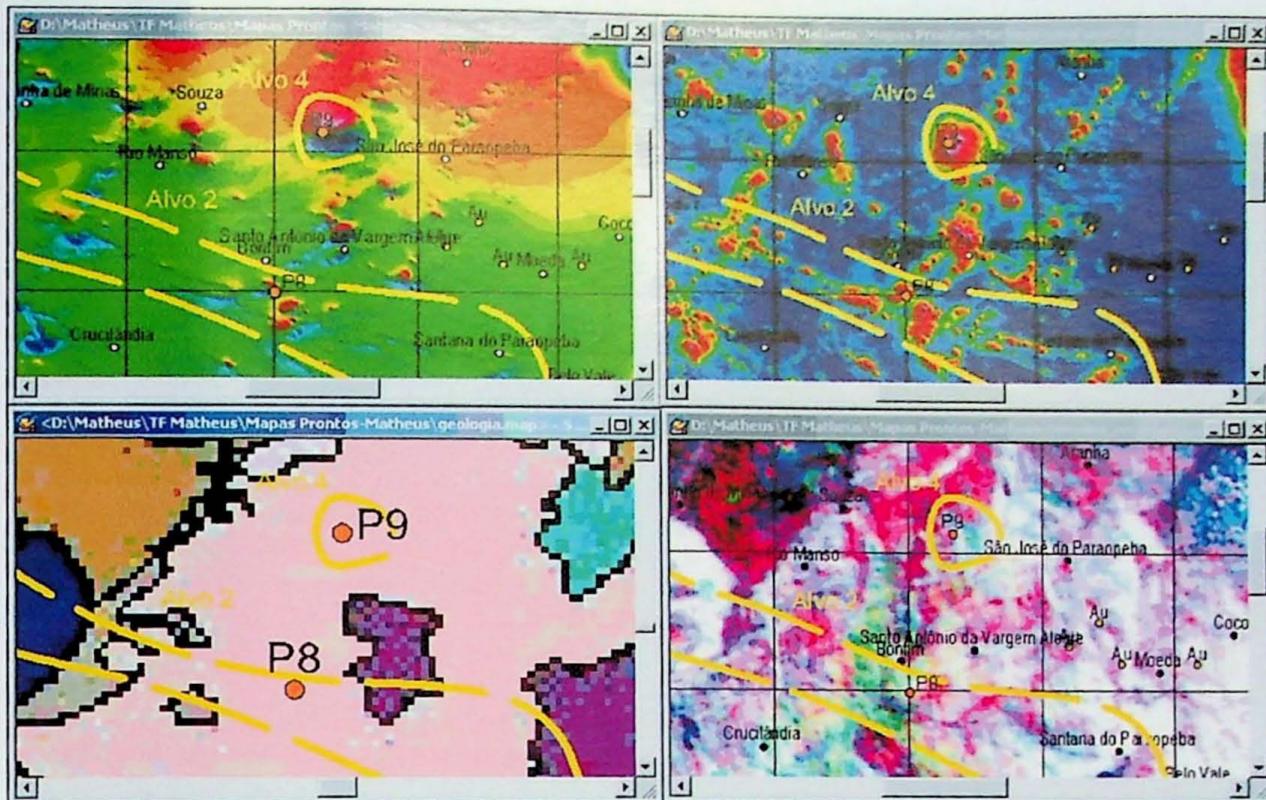


Figura 46: Imagem ilustrativa com os produtos geofísicos: campo magnético total, sinal analítico e contagem radiométrica ternária (quadrantes superior esquerdo, superior direito e inferior direito, respectivamente), e o mapa geológico (quadrante inferior esquerdo); alvos exploratórios dois e quatro.

Além disso, grande parte da área próxima ao ponto nove possui outras anomalias de menores dimensões, circuladas em vermelho na Figura 47, não verificadas em campo, mas que em analogia a esses dois pontos permite especular que também sejam formadas por rochas semelhantes às encontradas (itabiritos), e não pelo embasamento tonalítico-trochítmítico-granodiorítico arqueano.

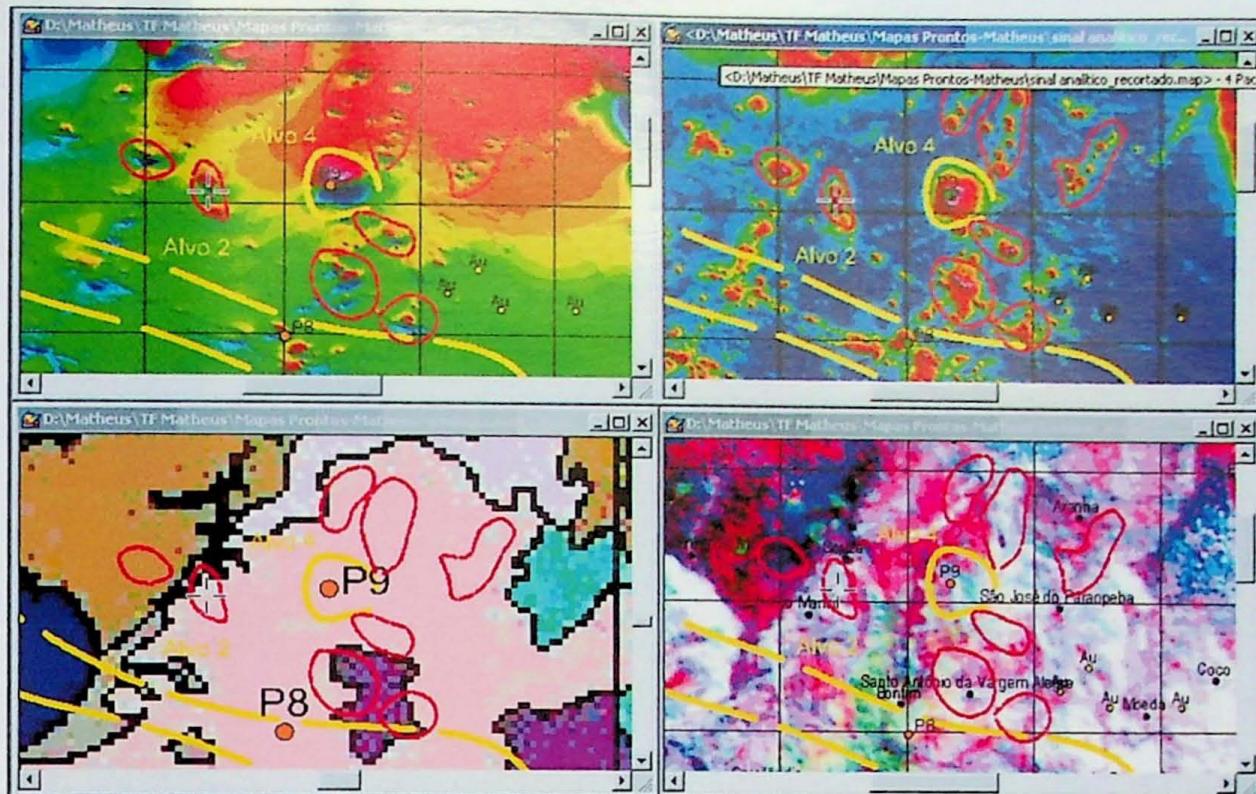


Figura 47: Imagem ilustrativa com os produtos geofísicos: campo magnético total, sinal analítico e contagem radiométrica ternária (quadrantes superiores e direito inferior, respectivamente), e mapa geológico (quadrante inferior esquerdo), com outras anomalias magnéticas próximas, semelhantes, porém não visitadas (em detalhe vermelho).

Para o caso do ponto número dez, localizado dentro do alvo exploratório um, a região é também descrita nos mapas geológicos como sendo formada por rochas intrusivas graníticas a tonalíticas no embasamento tonalítico-trondjemítico-granodiorítico arqueano. Nos produtos geofísicos utilizados não ocorrem anomalias magnéticas importantes associadas, porém há um lineamento magnético proeminente cortando a região, facilmente observado nos quadrantes superiores da Figura 48. Esses lineamentos, denominados como Lineamento 125° por alguns autores, são associados segundo Borges et al. (2001), ao modelo de diques rasos com raízes profundas.

Na imagem da contagem radiométrica ternária, quadrante inferior direito da figura, o comportamento observado, altas contagens radiométricas, não seria o esperado para o modelo de diques básicos/ultrabásicos, uma vez que estes deveriam apresentar baixas contagens ternárias, entretanto, a resolução do método ou o solo de cobertura poderiam ser os responsáveis pela não diferenciação dos valores ternários referentes ao lineamento, em comparação as localidades adjacentes.

No trabalho de verificação no campo foi descrito um veio composto predominantemente por quartzo com plagioclásio subordinado, Figuras 39, 40, 41 e 42; de aproximadamente 3 metros de altura. Em um primeiro momento, imaginou-se que esta feição poderia ser representativa dos lineamentos magnéticos observados nos mapas geofísicos, entretanto o veio não apresentava em sua composição ou em associação,

minerais magnéticos. Outro fator relevante que pode contradizer esta correlação é o baixo ângulo de mergulho verificado no veio, uma vez que estes lineamentos provavelmente são “feições” profundas e com altos ângulos de mergulho associado. Não foram observados diques básicos/ultrabásicos ou corpos gabroídes que segundo alguns autores estariam relacionados a estas feições magnéticas.

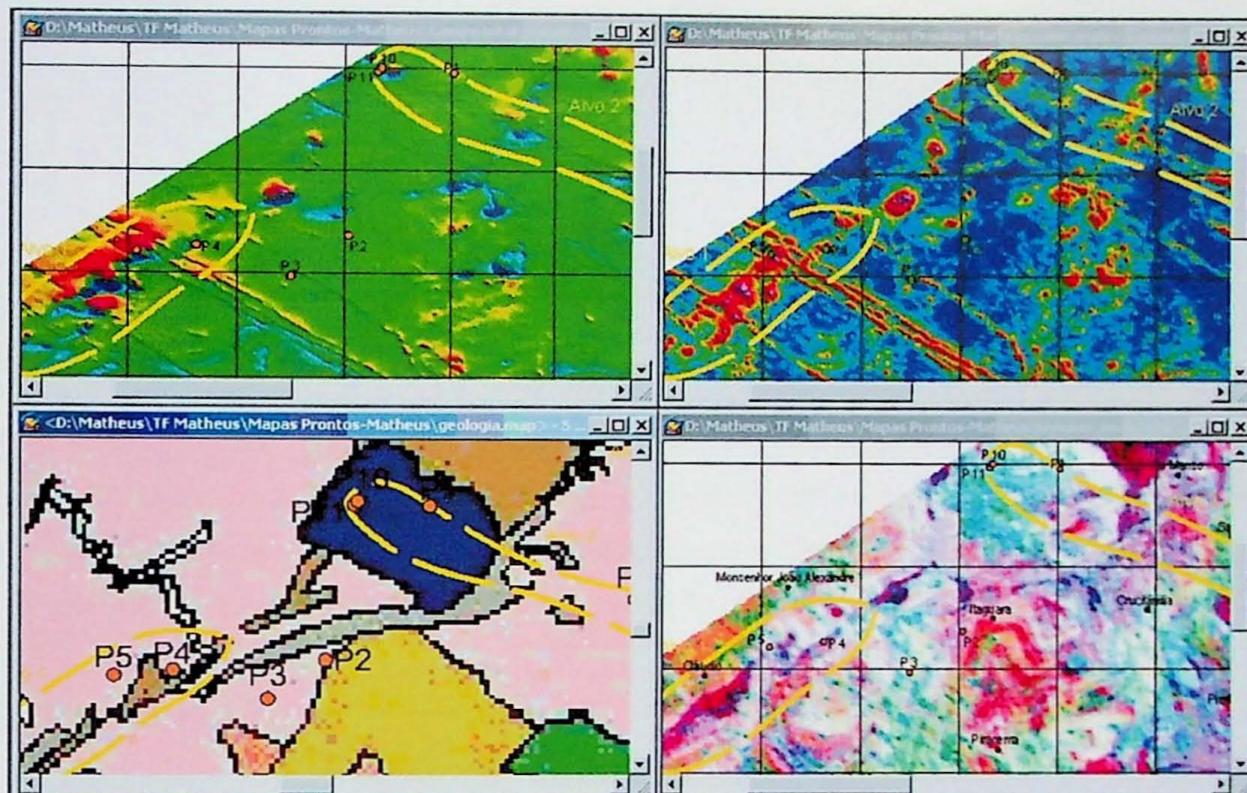


Figura 48: Imagem ilustrativa dos produtos geofísicos: campo magnético total, sinal analítico e contagem radiométrica ternária (quadrantes superiores e inferior direito, respectivamente), e mapa geológico (quadrante inferior esquerdo); alvo exploratório número um.

Nos pontos seis e sete, próximos ao alvo exploratório três, Figura 49, não foram descritos litotipos ou estruturas representativas do comportamento geofísico verificado nos mapas. A região apresentava extensa vegetação, impossibilitando a observação de afloramentos ou blocos rolados de formações ferríferas ou outras litologias com minerais magnéticos associados.

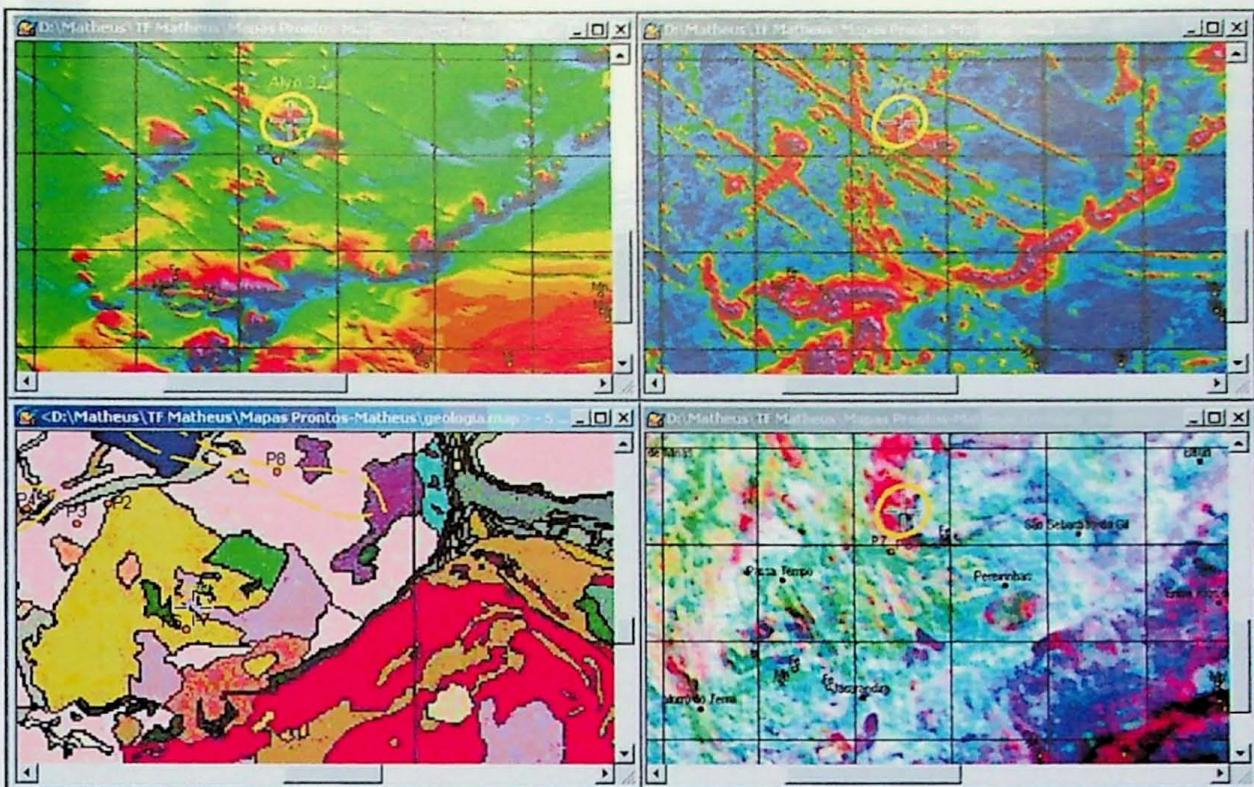


Figura 49: Imagem ilustrativa dos produtos geofísicos: campo magnético total, sinal analítico e contagem radiométrica ternária (quadrantes superiores e inferior direito, respectivamente), e mapa geológico (quadrante inferior esquerdo); com o alvo exploratório número três.

10. Recomendações

Em empresas de exploração mineral, após a realização destes trabalhos e se chegar à conclusão que os alvos são promissores, trabalhos de detalhe são efetuados.

Geralmente, as atividades efetuadas para o detalhamento dos alvos para pesquisa de ferro são magnetômetria terrestre, mapeamento geológico de detalhe, sondagens geológicas com recuperação de testemunhos e eventualmente polarização induzida (IP).

11. Conclusões

A integração das informações geológicas com os dados aerogeofísicos permitiu a identificação e a seleção de alvos exploratórios favoráveis à pesquisa mineral de ouro e principalmente ferro.

Após a seleção, o trabalho de verificação “in situ” possibilitou a correlação entre as anomalias e os litotipos e feições geológicas observadas no campo. Através desse seqüenciamento pode-se qualificar ao menos um dos alvos como promissor (alvo 4), ou seja, com potencial para a descoberta de um depósito de ferro de pequeno a médio porte. Trabalhos de detalhe, tais como: mapeamento geológico de maior escala, magnetômetria terrestre, polarização induzida (IP) e trabalhos físicos de prospecção, mais especificamente sondagem geológicas com recuperação de testemunho foram sugeridos como atividades futuras para o alvo, sempre intercaladas com discussões a respeito da viabilidade da continuidade/avanço dos trabalhos em cada etapa.

A partir da modelagem geofísica realizada via software *Model Vision*, para o alvo exploratório número quatro foi possível inferir a morfologia, extensão (~1500m) e profundidade provável (5-10m) do corpo rochoso responsável pela anomalia. A utilização desse recurso possibilita especular sobre o potencial dos recursos minerais relativos à anomalia, adotando-se para isso um valor médio para os teores de ferro para a formação ferrífera observada em campo, não efetuada neste trabalho uma vez que análises químicas das amostras coletadas não foram realizadas.

Além disso, o uso da metodologia possibilitou identificar claramente que as anomalias mostram uma discrepância entre os mapas temáticos aerogeofísicos e as cartas geológicas da região, pois muitas anomalias são identificadas, mas seus correspondentes litológicos não estão assinalados nas cartas geológicas regionais. A partir dessa informação, recomenda-se o uso da sistemática geofísica, da forma como foi abordada neste trabalho, como suporte a melhoria dos mapas geológicos dessa região.

O trabalho também foi de grande relevância devido à abordagem metodológica utilizada, semelhante à adotada por empresas de prospecção mineral que utilizam geofísica como ferramenta, além da sistemática de treinamento para geólogos que atuam nessas empresas.

Referências Bibliográficas

- ABREU, G. C. *Evolução Petrogenética e Metalogenética da Mina de Ouro de Pari e arredores, NE do Quadrilátero Ferrífero – MG.* 2004. 228f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BLAKELY, R. J. *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications.* [S.l.]. Cambridge University Press. 1996. 441p.
- BORGES, A. J.; DREWS, M. G. P. Características magnetométricas da bacia do São Francisco, em Minas Gerais. IN: PINTO, C. P; MARTINS-NETO, M. A. (Ed.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais.* Minas Gerais: SBG, 2001. p. 55-66.
- CHAUVET, A.; DUSSIN, I. A.; FAURE, M.; CHARVET, J. Mineralização Aurífera de Idade Proterozóica Superior e Evolução Estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, [S.l.], v. 24(3), p. 150-159, 1994.
- CHAUVET, A.; FAURE, M.; DOSSIN, I.; CHARVET, J. A three stage structural evolution of the Quadrilátero Ferrífero: consequences for the Neoproterozoic age and the formation of gold concentrations of the Ouro Preto area, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, Amsterdam, v. 68, p. 139-167, 1994.
- CHIASSINI, G. B. Chissini. *Mapeamento Litológico Estrutural 3D do setor “Entre Corpos” da Mina de Ferro de Casa de Pedra – MG.* 2005. 66f. Trabalho de Formatura - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- HARTMANN, L. A.; DELGADO, I. M. Cratons and orogenic belts of the Brazilian Shield and their contained gold deposits. *Mineralium Deposita*, [S.l.], v. 36, p. 207-217, 2001.
- KLEIN, C.; LADEIRA, A. E. Geochemistry and Petrology of Some Proterozoic Banded-Iron-Formations of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, [S.l.], v. 95, p. 405-428, 2000.
- KWITKO, R. R.; OLIVEIRA, C. G. O Deposito Aurífero de Antonio Pereira, Quadrilátero Ferrífero: Condições P-T e Natureza dos Fluídos Mineralizadores. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, p. 117-126, 2004.
- LOBATO, L. M.; RODRIGUES, L. C. R.; VIEIRA, F. W. R. Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of the gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, [S.l.], v. 36, p. 249-277, 2001.
- LOBATO, L. M.; RODRIGUES, L. C. R.; ZUCCHETTI, M.; NOCE, C. M.; BALTAZAR, O. F.; SILVA, L. C.; PINTO, C. P. Brazil's premier gold province. Part I: The tectonic, magmatic and structural setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, [S.l.], v. 36, p. 228-248, 2001.

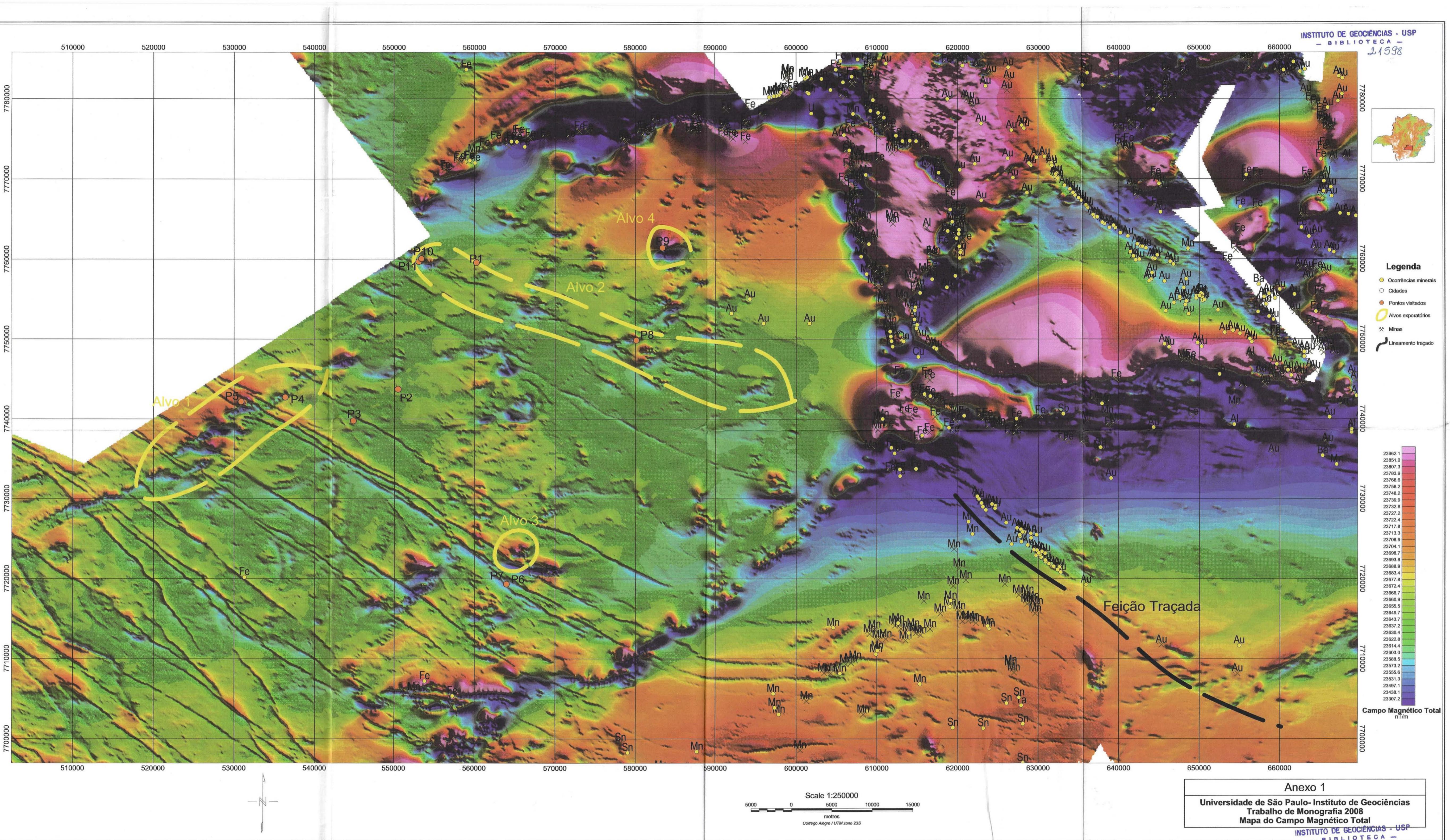
- LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. C. *Geofísica de Prospecção*, [S.l.], Universitária UFPA, v. 1, 311 p.
- PEREIRA, S. L. M.; LOBATO, L. M.; FERREIRA, J. E.; JARDIM, E. C. Nature and origin of the BIF-hosted São Bento gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, with special emphasis on structural controls. *Ore Geology Reviews*, [S.l.], v. 32, p. 1-25, 2007.
- RODRIGUES, L. C. R.; OLIVEIRA, C. G.; FRIEDRICH, G. The Archean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, [S.l.], v. 32, p. 1-28, 2006.
- SCHORSCHER, J. H. D. *Arcabouço Petrográfico e Evolução Crustal de Terrenos Pré-Cambrianos do Sudeste de Minas Gerais Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço Meridional e Domínios Granito-Gnaissicos Adajacentes*. 1992. 2v. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SHARMA, P. V. *Geophysical Methods in Geology*; 2. ed. New York. Elsevier. 1986. 432p.
- SILVA, A. M.; MCCAFFERTY, A.; PIRES, A. C. B.; RODRIGUES, L. C. R. Predictive Geophysical Model for Gold Mineralization in the Quadrilátero Ferrífero, Brazil: The Case of Cuiabá Mine. *Revista Brasileira de Geociências*, [S.l.], v. 30, p. 543-546, 2000.
- SILVA, A. M.; PIRES, A. C. B.; MACCAFFERTY, A.; MORAES, R. A. V.; XIA, H. Application of Airborne Geophysical Data to Mineral Exploration in the Exposed Terrains of the Rio das Velhas Greenstone Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, [S.l.], v. 33 (2-suplemento): p. 17-28, 2003.
- TEIXEIRA, W.; SABATÉ, P.; BARBOSA, J.; NOCE, C. M.; CARNEIRO, M. A. Archean and Paleoproterozoic Tectonic Evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Ed.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro. [s.n.]. 2000. p. 101-138.
- THORMAN, C. H.; DEWITT, E.; MARON, M. A. C.; LADEIRA, A. E. Major Brazilian gold deposits – 1982 to 1999. *Mineralium Deposita*, [S.l.], v. 36, p. 218-227, 2001.
- VALLADARES, F. B. *Geologia e Petro-Metalogênese da Mineralização de Ouro da Mina São Bento, Quadrilátero Ferrífero, MG*. 2004. 55f. Tese (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

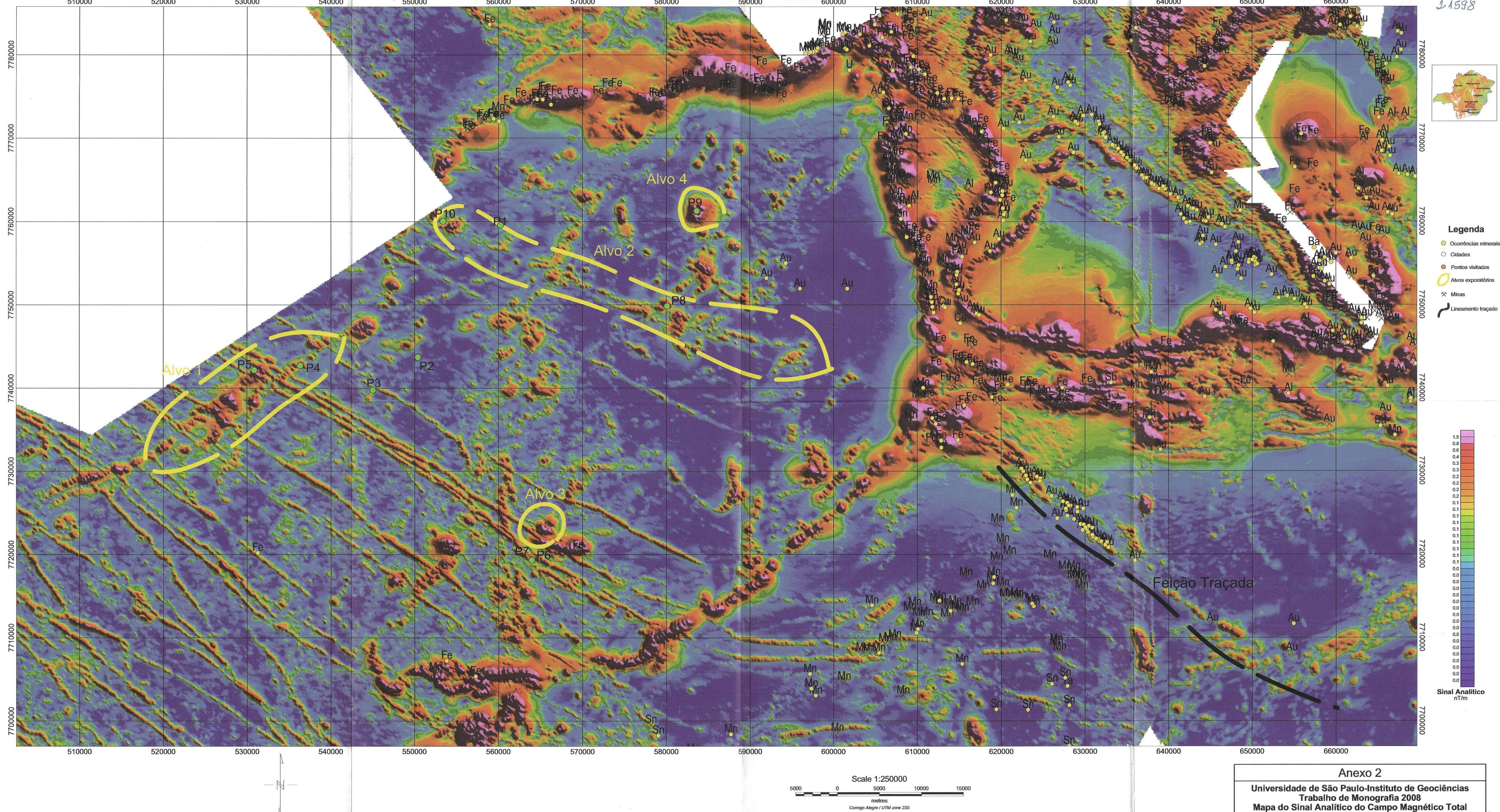
de acordo: Matheus M. F. Faria

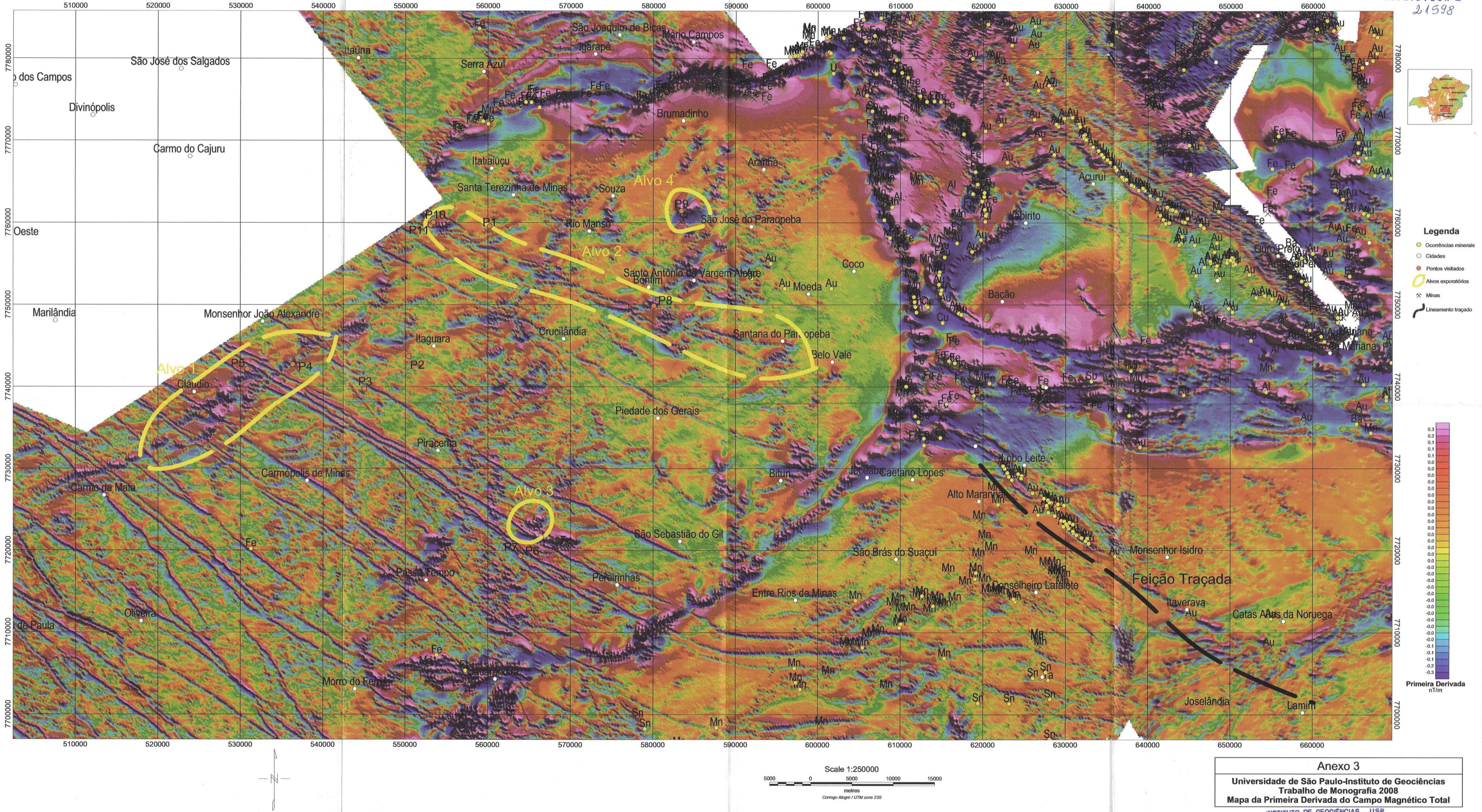
Matheus Mendes Ferreira de Faria

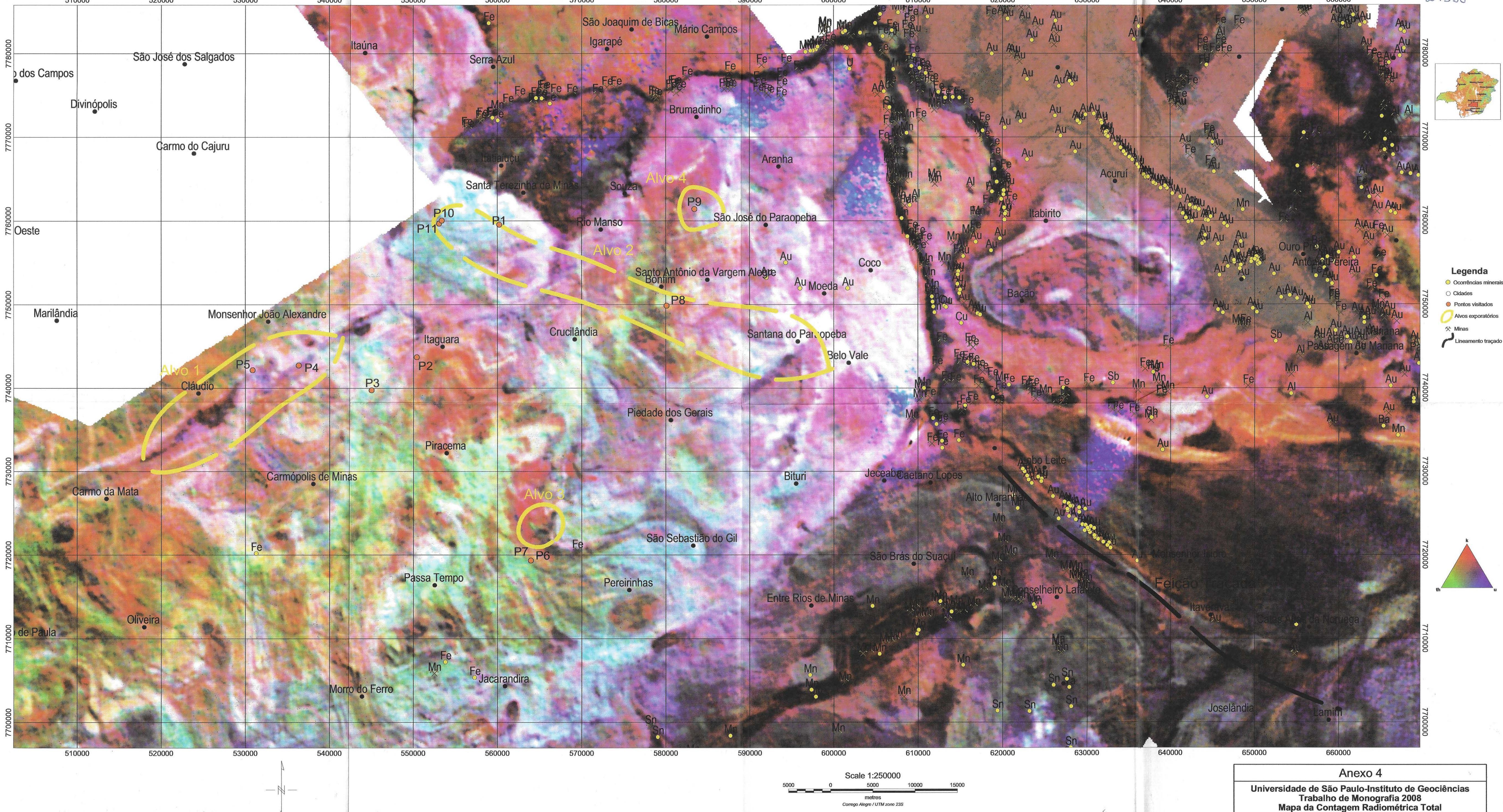
de acordo: _____

Jorge Silva Bettencourt









nexo 4

**niversidade de São Paulo-Instituto de Geociências
Trabalho de Monografia 2008
Mapa da Contagem Radiométrica Total**

DOAÇÃO	_____
IGC / USP	
Data:	10 / 02 / 09

