

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS  
MAGNETOMÉTRICOS E GAMAESPECTROMÉTRICOS NO ESTUDO DOS  
CONTROLES DAS MINERALIZAÇÕES DE METAIS BASE DA BACIA DO  
CAMAQUÃ, RS

Carolina Nalin

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas  
Co-orientador: Roberto Paulo Zanon dos Santos

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF – 10/09)

SÃO PAULO  
2010

TF  
N171  
C.p

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS  
MAGNETOMÉTRICOS E GAMAESPECTROMÉTRICOS NO ESTUDO DOS  
CONTROLES DAS MINERALIZAÇÕES DE METAIS BASE DA BACIA DO  
CAMAQUÃ, RS

Carolina Nalin



Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas  
Co-orientador: Roberto Paulo Zanon dos Santos

DEDALUS - Acervo - IGC



30900028417

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF – 10/09)

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Carolina Nalin", enclosed within a hand-drawn oval.

*de acordo,*  
*prof. J. Faraco Gallas*

SÃO PAULO  
2010

## AGRADECIMENTOS

Agradeço pessoas que participaram e contribuíram para a realização do presente trabalho.

A meus pais, pelo incentivo, apoio e pela compreensão por tantos dias sem retornar ao “doce lar”.

Às minhas colegas de república, Tatiane, Gabriela (Maminha) e Marina por ser a minha “família” em São Paulo que por muitas vezes me incentivou na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas por me apoiar durante o trabalho. Ao Roberto Paulo Zanon dos Santos pela amizade criada ao longo deste ano e pelos ensinamentos com o programa *Geosof Oasis Montaj*.

Ao Prof. Dr. Renato Paes de Almeida e a colega de turma Sheila Schuindt (Sertão) por me proporcionarem uma semana de trabalho de campo na Bacia do Camaquã.

Agradeço ao geólogo Paulo Miguel Haddad pela colaboração na elaboração do projeto inicial e pelo incentivo nos trabalhos.

Agradeço em especial ao geólogo Carlos Tomba pela intensa participação, conselhos, paciência e amizade.

À Marina de Almeida Meireles e Cristina Grabher, minhas colegas de longa data, das quais sempre tive recordações neste ano de trabalho.

À Companhia Brasileira de Recursos Minerais – CPRM – Serviço Geológico do Brasil pelo fornecimento dos dados do aerolevante geofísico (gamaespectrometria e magnetometria), fundamental para a realização do presente trabalho.

E finalmente aos colegas de faculdade que me acompanharam durante o período de graduação, gostaria de citar alguns nomes: Thyago (Xona), José Manuel (Jabah), Guilherme (Solangi), Denise (Pandê), Sheila (Sertão), Ana Paula (Pirua), Cinthia (Sherek), Manuela (Pinhão), Viviane (Jebah), Paulo (Potranka), Rodolfo (Pinky), Claudio (Kabong), Renata (Churisso), Lucas (Marmota), Lucas (sal Grosso), Danilo (Gozoroca), Sara (Sarinha), Felipe (Pimpolho), Enos (Rosa), Carlos (Carrasco), Aluisio (Smigol), Daniel (Axé), Vivian (Cachorra), Thais (Tchitcho), Larissa (Pig), Samuel (Bicha), Felipe (Colombia), Fernando (Fefo) e Vinícius (Pentelho).

## RESUMO

Neste trabalho foram processados dados digitais aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) que cobrem parte da Bacia do Camaquã, tradicional região com mineralizações de Cu-Pb-Zn, localizada na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul. Estes dados foram interpretados juntamente com dados de modelos digitais de elevação (SRTM) e mapas geológicos disponíveis na literatura, objetivando obter uma assinatura geológico-geofísica de possíveis áreas mineralizadas.

Desta forma, foi possível verificar, com base no mapa das ocorrências de metais base, que a mineralização da Bacia do Camaquã ocorre principalmente na cobertura sedimentar do Grupo Santa Bárbara ( $549 \pm 5$  Ma) e nas rochas vulcanossedimentares sotopostas a este grupo que compõem o Grupo Bom Jardim ( $590 \pm 6$  Ma). Estudos metalogenéticos descrevem que falhas profundas de direção geral NNE foram reativadas durante um evento deformador da bacia responsável pela geração de falhas e fraturas subsidiárias de direção geral NW a WNW, por onde ocorreu a percolação de fluidos hidrotermais que promoveram a mineralização, principalmente na região das Minas do Camaquã.

Com base nestas interpretações foi possível obter uma assinatura geofísica para as ocorrências de mineralizações de metais base (Cu-Pb-Zn) da Bacia do Camaquã que está possivelmente relacionada com zonas de hidrotermalismo associadas a falhas e fraturas.

A partir desta análise, foi possível delimitar alvos exploratórios para metais base na Bacia do Camaquã. A abordagem metodológica discutida neste trabalho poderá ser replicada a outras bacias sedimentares de mesmo contexto geológico e com ocorrências de mineralizações de metais base similares.



## ABSTRACT

At the present work have been processed aerogeophysics digital data (magnetometry and gamaespectrometry) that covers part of the Camaquã Basin, a traditional region with mineralization of Cu-Pb-Zn, placed in the south center region of Rio Grande do Sul State. This data was analyzed jointly with data of digital elevation models (SRTM) and geological maps available in bibliographies, intending to achieve a geological-geophysical signature of possible mineralized areas.

In this way, it was possible to verify, based on maps of base metals incidences, that the mineralization of Camaquã Basin occurs mainly in sedimentary rocks the cover of Santa Bárbara Group ( $549 \pm 5$  Ma) and in volcano-sedimentary placed beneath to this group that compose Bom Jardim Group ( $590 \pm 6$  Ma). Metallogenetic studies describe that deep faults of general strike NNE were reactivated during a deforming event of the basin responsible for the creation of subsidiary faults and fractures of general direction NW to WNW from where has occurred percolation of hydrothermal fluid that fostered mineralization, mainly in the region of Minas of Camaquã.

Based on these analyses it was possible to obtain a geophysical signature to the incidences of mineralization of metal base (Cu-Pb-Zn) of Camaquã Basin, which is possibly related to hydrothermalism associated to faults and fractures.

From this analysis, it was possible to delimit exploratory targets to base metals in Camaquã Basin. The methodological approach discussed in this work could be applied to other sedimentary basins of the same geological context and with similar incidences of base metal mineralization.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	3
3.	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	3
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
4.1	Histórico do Distrito Cuprífero de Camaquã .....	5
4.2	Origem da Bacia do Camaquã .....	6
4.2.1	Geologia Regional.....	7
4.3	Mineralização e Metalogênese do Distrito Cuprífero de Camaquã .....	10
4.4	Geofísica Aplicada à Prospecção Mineral .....	13
4.4.1	Magnetometria .....	13
4.4.2	Gamaespectrometria .....	15
5.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
5.1	Processamento dos Dados .....	18
5.2	Produtos Gerados a partir dos Dados Geofísicos Processados .....	18
5.2.1	Produtos dos Dados de Campo Magnético Total.....	18
5.2.1.1	Derivadas .....	18
5.2.1.2	Sinal analítico .....	19
5.2.1.3	Campo magnético total por sombreamento.....	19
5.2.1.4	Deconvolução de Euler 2D .....	19
5.2.2	Produtos dos Dados Gamaespectrométricos.....	19
5.2.2.1	Ternário .....	19
5.2.2.2	Razões entre os elementos radiométricos.....	19
5.3	Interpretação dos Mapas Geofísicos.....	20
6.	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	20
7.	RESULTADOS OBTIDOS.....	22
7.1	Processo de Trabalho, Filtros e Parâmetros Definidos para o Tratamento dos Dados .....	22
7.2	Assinatura Aerogeofísica e a Delimitação de Alvos Favoráveis para as Ocorrências de Metais Base na Bacia do Camaquã .....	26
8.	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	38
9.	CONCLUSÕES .....	40
10.	BIBLIOGRAFIA.....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 – Mapa geológico da Bacia do Camaquã.....	4
Figura 02. Esquema do processo de micronivelamento dos dados.....	24
Figura 03. A) Mapa do canal do CMT (nT) antes do micronivelamento B) Mapa do canal do CMT (nT) micronivelado.....	25
Figura 04 – Mapa geológico da Bacia do Camaquã com ocorrências de metais base.....	27
Figura 05 – Mapa aerogeofísico do campo magnético total.....	28
Figura 06 – Mapa aerogeofísico (magnetométrico) da primeira derivada na vertical.....	29
Figura 07 – Mapa aerogeofísico (gamaespectrométrico) da razão K/Th.....	30
Figura 08 – Mapa da deconvolução de Euler.....	31
Figura 09 – Detalhe do mapa da deconvolução de Euler nas Minas do Camaquã.....	31
Figura 10 – Mapa da composição dos dados da razão K/Th e da primeira derivada em Z.....	34
Figura 11 – Alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base delimitados na Sub-Bacia Camaquã Central.....	35
Figura 12 – Alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base delimitados na Sub-Bacia Camaquã Ocidental.....	36
Figura 13 – Alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base delimitados na Sub-Bacia Camaquã Oriental.....	37

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 01. Características do aerolevanteamento do projeto geofísico Camaquã Área 1.....	17
Quadro 02 – Cronograma das atividades realizadas no trabalho de formatura.....	21
Quadro 03 – Principais trabalhos realizados durante o trabalho de formatura.....	21
Quadro 04 – Esquema do processo de interpretação dos dados aerogeofísicos.....	33
Quadro 05 – Principais características das anomalias geofísicas dos alvos exploratórios.....	39

## 1. INTRODUÇÃO

A descoberta de novos depósitos minerais tem sido cada vez mais onerosa pelo fato destes possuírem dimensões reduzidas, estarem em maiores profundidades ou por ocorrerem em áreas remotas e às vezes com escassa informação geológica. Portanto, torna-se cada vez mais necessário o uso de tecnologias complementares para delimitar áreas de maior potencial mineral buscando reduzir os custos dos trabalhos de pesquisa, além do tempo despendido e os riscos inerentes a esta atividade.

A aplicação de ferramentas aerogeofísicas como fonte de informação indireta à pesquisa mineral deve ser realizada de forma cautelosa, pois a metodologia utilizada pode variar de acordo com o mineral de interesse e com o contexto geológico e metalogenético da área de interesse.

No caso da Bacia do Camaquã faz sentido o uso de dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria se aplicado de forma indireta, objetivando a verificação de assinaturas geofísicas qualitativas que realcem informações relacionadas às características metalogenéticas de possíveis ocorrências minerais. No caso das mineralizações de Cu-Pb-Zn, conhecidas historicamente na região, estas não apresentam respostas diretamente relacionadas às propriedades físicas mensuradas pelos métodos geofísicos utilizados neste trabalho. Porém, apresentam importantes relações indiretas com o contexto geológico da área de estudo.

Neste sentido, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica acerca dos modelos metalogenéticos propostos para o Distrito Cuprífero de Camaquã com base principalmente nas características litoestratigráficas, estruturais, mineralógicas e até mesmo isotópicas dos depósitos conhecidos na bacia.

Em essência, as pesquisas acadêmicas com enfoque metalogenético realizadas no Distrito Cuprífero de Camaquã abordam três principais modelos de mineralização, sendo eles: i) Magmático hidrotermal, admitindo para a origem da mineralização uma possível origem profunda a partir de rocha magmática de composição intermediária (Bettencourt 1972, Remus *et al.* 2000), ii) Diagenético, baseando-se principalmente na concordância da disposição da mineralização com a dos estratos sedimentares (Badi & Gonzalez 1988; Teixeira & González 1988), iii) Hidrotermal Epitermal, associando a fase de mineralização à fluidos hidrotermais rasos, considerando também águas meteóricas (Bettencourt 1976).

Neste trabalho, tentou-se definir uma assinatura aerogeofísica para as ocorrências minerais descritas na literatura, bem como a comparação desta assinatura com modelos metalogenéticos conhecidos. Assim, com base nos trabalhos de Bettencourt (1972) onde o autor demonstra claramente que independentemente do modelo metalogenético, as

mineralizações de Cu-Pb-Zn conhecidas estão fortemente condicionadas a estruturas tectônicas. Desta forma, buscou-se a utilização de técnicas que evidenciassem as relações estruturais com base essencialmente nas respostas aeromagnetométricas para o realce de lineamentos e, nas respostas aerogamaespectrométricas para as relações de alteração mineral, zoneamentos hidrotermais e contatos litológicos favoráveis a mineralização de metais base.

A formação da Bacia do Camaquã é também bastante discutida entre os pesquisadores e ainda hoje não há um consenso sobre o tema. Foram publicados três modelos relacionados à gênese da Bacia do Camaquã, sendo eles: i) Bacia periférica de antepaís, tendo sua gênese associada ao final da Orogenia Brasileira/Pan Africana (Fragoso César 1991), ii) Bacia de *strike-slip* ainda relacionando a sua gênese ao final da Orogenia Brasileira/Pan Africana (Oliveira & Fernandes 1991), iii) Bacia de *rift*, posterior a Orogenia Brasileira/Pan Africana (e.g. Fragoso César *et al.* 2000; Fambrini 2003; Janikian 2004; Almeida 2005; Almeida *et al.* 2010).

Neste trabalho considerou-se a metalogênese do Distrito Cuprífero de Camaquã como de hidrotermalismo epitermal, relacionando a mineralização à fluidos hidrotermais rasos e também de origem meteórica, sendo esta proposta publicada por Bettencourt (1976) numa reconsideração de suas conclusões obtidas em tese de doutoramento. Ainda foi considerado o modelo diagenético devido à mineralização ocorrer, sobretudo na Formação Bom Jardim, composta por rochas vulcanossedimentares e no Grupo Santa Bárbara, composto por rochas sedimentares.

O ambiente tectônico de formação da Bacia do Camaquã discutido neste trabalho é o de bacia *rift*, proposto primeiramente por Fragoso César *et al.* 2000, que reconsiderou suas conclusões obtidas na tese de doutorado. Posterior a publicação deste trabalho, um grupo de pesquisadores do Instituto de Geociências da USP tem coletado dados estruturais, de paleocorrentes e de proveniência que corroboram a hipótese da Bacia do Camaquã ter sua formação associada a um evento extensional.

Neste contexto, a caracterização aerogeofísica é uma ferramenta útil para um melhor detalhamento dos contatos litológicos e de lineamentos em áreas de difícil acesso, por meio de dados da magnetometria, além da verificação de zonas anômalas ricas em radio elementos que possam estar associadas à gênese de depósitos hidrotermais.

## **2. OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo obter o processo adequado para o tratamento de dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria que foram adquiridos pela CPRM no ano de 1973. E, conseqüentemente, a interpretação dos produtos obtidos neste processamento busca obter uma assinatura aerogeofísica para as ocorrências de metais base e ainda correlacioná-la com os modelos metalogenéticos proposto na literatura.

Como objetivo paralelo, este projeto familiarizou a aluna com a técnica de processamento dos dados aerogeofísicos e com a posterior análise dos resultados obtidos, bem como a obtenção de uma assinatura aerogeofísica da mineralização, visando à definição de critérios prospectivos para a exploração regional de metais base.

Sinteticamente, os objetivos do projeto são:

1. Processamento dos dados aerogeofísicos magnetométricos e aerogamaespectrométricos;
2. Elaboração de mapas com os dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria;
3. Interpretação dos resultados obtidos, bem como a correlação com dados geológicos já publicados, disponíveis na literatura;
4. Obtenção de assinatura das anomalias aerogamaespectrométricas e aeromagnetométricas nas áreas com ocorrência de metais base;
5. Delimitação de alvos exploratórios favoráveis à mineralização de metais base na Bacia do Camaquã.

## **3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo compreende a área do projeto aerogeofísico Camaquã - Área 1, realizado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil, e está localizada na Bacia do Camaquã, centro-sul do estado do Rio Grande do Sul (Figura 01).

A interpretação dos dados aerogeofísicos teve como foco a área do Distrito Cuprífero de Camaquã, situado no município de Caçapava do Sul, que dista aproximadamente 250 km da cidade de Porto Alegre - capital do Estado. O acesso até Caçapava do Sul se faz através da BR-290, e para acessar o Distrito Cuprífero de Camaquã deve-se seguir por cerca de 30 km por estrada não pavimentada na direção sudeste.



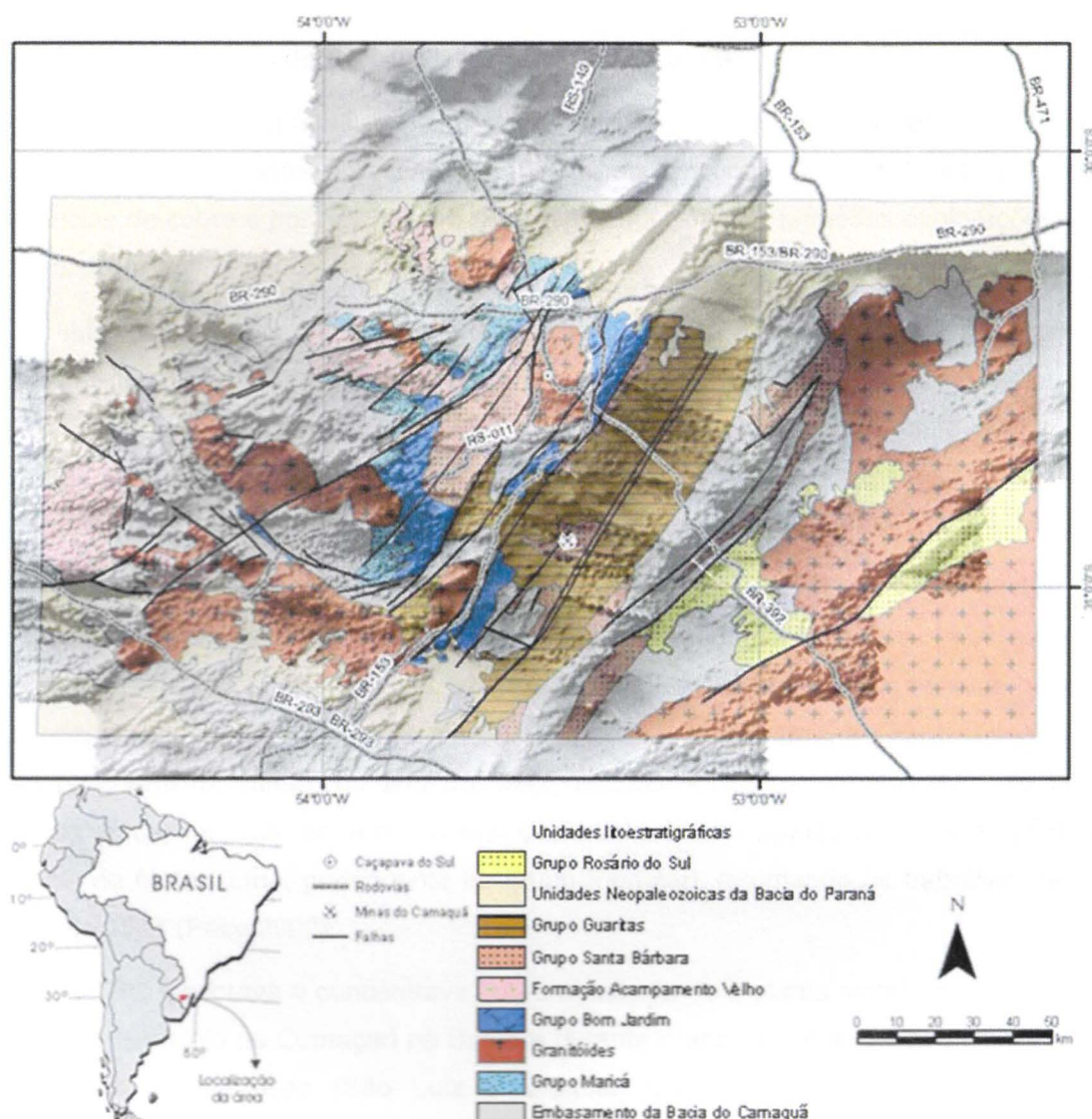


Figura 01 – Mapa geológico da Bacia do Camaquã. A área em escala de cinza refere-se aos limites do levantamento aerogeofísico. Modificado de Fragozo César et al. (2000) e Almeida (2005).

#### 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item é apresentada a revisão bibliográfica realizada durante a elaboração deste trabalho. Os temas estudados foram: o histórico do Distrito Cuprífero de Camaquã, os modelos de origem da Bacia do Camaquã propostos, os modelos metalogenéticos propostos, bem como os controles das mineralizações e o processamento e interpretação das técnicas de magnetometria e gamaespectrometria aeroportadas aplicadas à prospecção de metais base.

#### 4.1 Histórico do Distrito Cuprífero de Camaquã

As Minas do Camaquã estão situadas no município de Caçapava do Sul, estado do Rio Grande do Sul, onde por volta de 1880 foram encontradas, por mineiros ingleses, ocorrências de cobre e por este motivo essa região foi alvo das primeiras explorações deste metal no Brasil.

Inicialmente, o cobre era exportado para a Europa com teores na ordem de 15 a 20%. No entanto, em 1899 os trabalhos foram paralisados, devido a uma crise causada na cotação internacional do metal. Em 1900 a produção foi retomada pela *Société Anonyme des Mines de Cuivre de Camaquan*, fundada em Bruxelas e que conduziu a lavra até 1908, quando ocorreu nova queda nos preços do cobre provocando nova suspensão nos trabalhos (Teixeira & Gonzalez 1988).

De 1928 a 1936, o Serviço Geológico e Mineralógico que em 1934 passou a Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), empreendeu uma série de trabalhos relacionados à prospecção metalífera no Estado do Rio Grande do Sul. Como consequência deste programa foi criada, no ano de 1942, a CBC – Companhia Brasileira de Cobre, empresa de capital misto entre o Governo do Estado do Rio Grande do Sul e a Laminação Nacional de Metais Ltda. pertencente ao grupo Pignatari, retomando os trabalhos da mina no ano de 1944 (Paim 2002).

A CBC explorava e concentrava cobre abastecendo a planta metalúrgica da Caraíba Metais no município de Camaçari na Bahia e durante o ano de 1954 realizou a abertura de duas minas subterrâneas (São Luiz e Uruguai) que impulsionaram os trabalhos de exploração. A partir do ano de 1957 o grupo Pignatari passou a controlar totalmente a CBC. Contudo, em 1974, quando problemas devido à redução dos teores praticados somados à desativação da única metalúrgica que utilizava o concentrado de cobre produzido pela CBC ocasionaram a suspensão das atividades de lavra.

Desde então a CBC direcionou suas atividades para a pesquisa geológica e contratou os serviços da Rio Doce Geologia e Mineração (DOCEGEO), entre 1975 e 1977, iniciando o “Projeto Expansão Camaquã” que desenvolveu estudos de geologia de minas, caracterização do minério e ampliação das reservas (Teixeira & Gonzalez 1988).

Esses trabalhos forneceram subsídios para que em 1981 a exploração fosse retomada com o uso de técnicas altamente mecanizadas tanto nas minas subterrâneas (São Luiz e Uruguai) como na mina a céu aberto (Uruguai). No entanto, o teor de cobre lavrado durante 1981 e 1988 era em média de 0,57%, valor muito abaixo das projeções inicialmente previstas que era de 1,05% e, por estes motivos, a CBC contraiu dívidas com o governo brasileiro (Paim 2002).



Em 1987, o BNDES assume o endividamento bancário da empresa e em 1988 a CBC é colocada em leilão. No entanto, não foi arrematada por nenhuma empresa qualificada presente. Como uma solução alternativa, a CBC acaba sendo comprada por seus próprios funcionários, que vieram a constituir uma nova empresa, chamada de Bom Jardim S.A. Esta empresa assumiu o comando das atividades, saldou sua dívida com o BNDES antes do prazo estipulado no Protocolo de Intenções, e continuou a minerar o cobre até maio de 1996, quando ocorreu o esgotamento total das reservas economicamente viáveis conhecidas (Paim 2002).

#### 4.2 Origem da Bacia do Camaquã

A Bacia do Camaquã, situada no extremo sul do Brasil, tem direção NNE e com largura e comprimento que atingem cerca de 100 km. É segmentada nas sub-bacias Camaquã Ocidental, Central (onde as minas em questão estão situadas) e Oriental, as quais são limitadas pelo soerguimento de altos do embasamento (Caçapava do Sul a oeste e Serra das Encantadas a leste). Os limites externos da Bacia do Camaquã são definidos a leste por rochas granito-gnáissicas miloníticas do seu embasamento, representada pelo Complexo Metamórfico Porongos (Carvalho 1932). Ao norte, a oeste e ao sul é recoberta por rochas sedimentares permianas da Bacia do Paraná.

A origem da bacia é bastante discutida entre os autores (e.g. Almeida 1966; Fragoso César 1984, Fragoso César *et al.* 1985, Fragoso César 1991; Fragoso César *et al.* 2000; Oliveira & Fernandes 1991; Fambrini 2003, Janikian 2004; Almeida 2005; Almeida *et al.* 2010), e ainda hoje não há um consenso sobre o tema.

O primeiro autor a estudar a origem e evolução da Bacia do Camaquã foi Almeida (1966), tendo como finalidade a elaboração da Carta Tectônica do Brasil. Neste trabalho o autor cita os riscos de realizar interpretações equivocadas e formular hipóteses inverossímeis devido aos fatos conhecidos serem, naquela época, ainda escassos. Diante de tal situação, Almeida (1966) interpretou a Bacia do Camaquã como uma bacia molássica, relacionando sua formação a fases tardias da Orogenia Brasileira/Pan Africana do Neoproterozoico, incluindo esta bacia no grupo das bacias do “estágio de transição da Plataforma Sul-Americana”.

Em consenso com o trabalho desenvolvido por Almeida (1966), Fragoso César (1984), Fragoso César *et al.* (1985) e Fragoso César (1991) também interpretaram a bacia como molássica, tendo sua origem associada ao final do Ciclo Brasileiro. Posteriormente, a bacia foi interpretada por Oliveira & Fernandes (1991) como de *strike-slip*, ainda relacionando a sua origem ao final do Ciclo Brasileiro.

Nos últimos anos tem sido realizado intenso trabalho na Bacia Sedimentar do Camaquã com o objetivo de coletar dados que auxiliem a interpretação de sua origem e evolução (e.g. Fragoso César *et al.* 2000; Fambrini 2003; Janikian 2004; Almeida 2005; Almeida *et al.* 2010). Estes autores têm demonstrado evidências de que a Bacia do Camaquã teve sua origem associada a eventos extensionais, posteriores a Orogenia Brasileira/Pan Africana, que originou o Supercontinente Gondwana, e anteriores à instalação das grandes bacias intracratônicas paleozoicas.

As principais características que vinculam a origem da Bacia do Camaquã a eventos extensionais são de que há predominância de falhas normais (posteriormente reativadas como inversas ou de transcorrência durante evento de deformação), que alimentam deltas aluviais e que, pela análise de proveniência nos sedimentos, é possível afirmar que não houve deslocamento horizontal das fontes, descartando o modelo de *strike-slip* para a origem da bacia. Outro indício peculiar da bacia de *rift* é o expressivo vulcanismo bimodal contemporâneo a um grande volume de granitos, indicando que a fusão mantélica e crustal ocorreu num evento extensional (Almeida *et al.* 2010).

Ainda segundo os mesmos autores, as temperaturas elevadas podem ter causado o afinamento da litosfera, possibilitando a deformação extensional e recorrente transcorrência, esta última formando grandes zonas de cisalhamento na região com direção principal NNE e que tem sido bastante confundida com a tectônica formadora da bacia, embora ocorrida no início do Cambriano, posterior à formação desta.

#### 4.2.1 Geologia Regional

Pelo fato de muitas vezes as unidades da Bacia do Camaquã não ocorrerem com continuidade lateral foram geradas, pelos autores, diferentes interpretações acerca da estratigrafia da bacia.

Para este trabalho optou-se por adotar a coluna estratigráfica mais recente, definida por Fragoso César *et al.* (2003). Estes autores definiram o Supergrupo Camaquã que inclui todas as rochas sedimentares e sucessões vulcânicas da Bacia do Camaquã que possuem espessura aproximada de 10.000 metros. Foram realizadas datações nas rochas vulcânicas e intrusivas que indicam idade de deposição máxima e mínima deste Supergrupo em 605 a 535 Ma.

O Supergrupo Camaquã é composto da base para o topo pelas seguintes unidades:

Grupo Maricá, representado por depósitos siliciclásticos marinhos e fluviais, com idade de  $600.5 \pm 2.4$  Ma datado por U-Pb em zircão de apófises graníticas (Janikian 2004),

sendo estas apófises graníticas correlacionáveis com o *stock* granítico de Lavras do Sul (Almeida 2005);

Grupo Bom Jardim, com ocorrência de depósitos aluviais e lacustres e rochas vulcânicas de composição basáltica e andesítica, com idades entre  $590\pm6$ ,  $586\pm8$ , e  $587\pm7$  Ma datados por Ar-Ar referente às idades de cristalização de plagioclásio da Formação Hilário (Janikian 2004) e  $580.5\pm3.6$  Ma datadas por U-Pb pelo método SHRIMP em cristais de zircão de um nível de tufo intercalado com sedimentos de granulação fina (Janikian 2004);

Formação Acampamento Velho, rochas vulcânicas ácidas e básicas que apresentam cristalização de U-Pb com idade de  $574\pm7$  Ma (Janikian 2004) e diques tardios básicos  $550\pm21$  Ma e  $555\pm22$  Ma, determinada pelo mesmo método (Janikian 2004);

Grupo Santa Bárbara, ocorre nas três sub-bacias, apresenta predominantemente contato tectônico com as unidades inferiores e apenas localmente possui contato erosivo com os andesitos do Grupo Bom Jardim e com vulcânicas ácidas da Formação Acampamento Velho. É representado por depósitos siliciclásticos aluviais e costeiros que na sub-bacia central hospedam a mineralização do Distrito Cuprífero de Camaquã. A mineralização ocorre na parte oeste de uma janela estrutural em que Grupo Santa Bárbara está justaposto com o Grupo que o sobrepõem, o Grupo Guaritas. Com base nas datações de rochas magmáticas das unidades abaixo e superiores ao Grupo Santa Bárbara, considera-se uma idade de mínima para estes depósitos de  $549\pm5$  Ma (Almeida 2005).

De acordo com trabalhos relacionados a estudos de análise de proveniência nas exposições do Grupo Santa Bárbara (Almeida 2005, e Fambrini 2007), sugere-se como área fonte para a Formação da base deste Grupo, as unidades inferiores do Supergrupo Camaquã, sendo assim considera-se que até o início da deposição do Grupo Santa Bárbara a Bacia do Camaquã ainda não havia sido segmentada em sub-bacias.

A elevação do Alto de Caçapava resultou na segmentação da Bacia do Camaquã e modificou o padrão de sedimentação deste Grupo, configurando uma sedimentação com proveniência do embasamento da bacia, caracterizado por rochas de baixo grau metamórfico (filito, muscovita xisto, metavulcânicas e metavulcanossedimentares) de idade neoproterozoica (Toniano e Criogeniano) do Terreno Rio Vacacaí (Fragoso-César 1991). Gradacionalmente, no sentido de topo das unidades do Grupo Santa Bárbara, ocorre redução da frequência de clastos do Terreno Rio Vacacaí e aumento de clastos de rochas do *stock* de Caçapava do Sul, composto por granitóides róseos com predomínio de sienogranitos e monzogranitos médios com foliação de fluxo e milonitização local.

De acordo com Almeida (2005) esta análise de proveniência sugere que a elevação do Alto de Caçapava foi simultânea à deposição do Grupo Santa Bárbara e que primeiramente foram erodidas rochas do embasamento da bacia para posterior exposição completa do Granito Caçapava do Sul; e

Grupo Guaritas, onde repousam depósitos continentais aluviais e eólicos com discordância angular sobre o Grupo Santa Bárbara. Santos (2010) relacionou esta discordância angular com evento de compressão NE-SW caracterizado por falhas transcorrentes oblíquas. O Grupo Guaritas é frequentemente afetado por intrusões subvulcânicas básicas a intermediárias da suíte intrusiva Rodeio Velho que foram datadas por  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ , fornecendo idade de resfriamento em  $535.2 \pm 1.1$  Ma (Vasconcelos *et al.* 2002).

A história de subsidência e de soerguimento da bacia é bastante complexa, sugerida pela delimitação com inconformidade angular do Supergrupo Camaquã e por este ocorrer com variações de espessuras das unidades em áreas diferentes (Almeida *et al.* 2010).

Ainda segundo os mesmos autores, o estilo deformacional da bacia preservado é caracterizado por mergulhos normais altos, oblíquos e por falhas transcorrentes, que são definidos em planos discretos (estrias, dobras de arraste e raras brechas tectônicas). Falhas inversas são observadas apenas localmente, sem uma posição estratigráfica específica.

Associa-se à formação da bacia a um evento extensional que gerou falhas normais com *trends* ENE-WSW, caracterizado por possuir  $\sigma_1$  vertical e  $\sigma_3$  no quadrante NE e que está associado à formação do Grupo Bom Jardim. A idade deste evento é de 600 a 580 Ma. Num evento posterior, cerca de 575 Ma de caráter também extensional, porém com  $\sigma_3$  no quadrante NW, foram geradas falhas de direção NW que foram responsáveis pela origem da Formação Acampamento Velho e dos Grupos Santa Bárbara e Guaritas.

A deformação da bacia é associada fundamentalmente a uma compressão que gerou falhas transcorrentes de direção NNE que estão associadas ao evento de inversão da bacia e que justapõem sucessões do Supergrupo Camaquã a rochas do embasamento. Este sistema de falhas, denominado por Ribeiro *et al.* (1966) como "Sistema de Falhas Irapuá", também é responsável por limites tectônicos entre as unidades do Supergrupo Camaquã devido ao soerguimento do Alto de Caçapava a oeste e do Alto da Serra das Encantadas a leste, que limitam as subdivisões da Bacia do Camaquã ocidental, central e oriental (Almeida 2005).

De acordo com o mesmo autor, este evento de compressão NW gerou falhas transcorrentes sinistrais de direção NNE a NNW e dextrais com direção de ENE a ESE, e é caracterizado por  $\sigma_1$  horizontal no quadrante NW e  $\sigma_2$  vertical. Este evento foi posterior ao Grupo Guaritas e à Suíte Intrusiva Rodeio Velho e anterior ao Grupo Itararé e, portanto,

pode ter ocorrido em qualquer intervalo entre 535 Ma e o início do Permiano, com provável idade de 530 Ma (Almeida 2005). Ainda no contexto tectônico da região, (Tombo 2006) sugere a ocorrência de um importante evento de reativação tectônica de idade pós-triássica, com indícios de recorrência de movimentações até o Cenozóico.

“O controle tectônico das mineralizações de cobre das Minas do Camaquã, associado a falhas de direção WNW (Bettencourt 1972), provavelmente deve-se ao evento de compressão NW, no qual tais falhas comportam-se como estruturas extensionais, próximas à direção T de falhas conjugadas” (Almeida 2005).

#### **4.3 Mineralização e Metalogênese do Distrito Cuprífero de Camaquã**

Talvez o trabalho mais detalhado relacionado à metalogênese do Distrito Cuprífero de Camaquã foi realizado por Bettencourt (1972) em tese de doutoramento sobre o tipo de jazimento das Minas do Camaquã, para tanto realizou trabalho de campo mapeando em escala de detalhe os setores Uruguai e São Luiz e trabalhos laboratoriais.

Com tais estudos foi possível concluir que a mineralização cuprífera ocorre sob duas formas: de sulfetos disseminados, que variam desde grãos microscópicos isolados até concentrações onde constituem o cimento da rocha, e sob a forma filoneana sugestiva de um controle estrutural para a mineralização. Segundo o autor, tais veios e filões foram formados principalmente pelo preenchimento e substituição ao longo de planos de falha de direção NW, que tiveram movimentação contínua por longo período, com idades pré e pós mineralização, o que é atestado pelo intenso fraturamento dos minerais de minério mais antigos dos veios.

Além do controle estrutural, a deposição do minério seguiu controles litológicos e estratigráficos. Por esta razão, ocorrem irregularidades ao longo da direção e mergulho dos filões, que tornam difícil a interpretação dos limites da mineralização em profundidade, principalmente nos contatos entre os arenitos e conglomerados. Segundo Newhouse (1942), quando o minério é formado em rochas com diferentes competências ao longo de falhamentos, não ocorre regularidade na sua deposição. Este efeito é devido ao fato das falhas principais sofrerem deflexões, que ocasionam fraturamento e brechamento em grande escala ao longo do contato.

Bettencourt (1972) caracteriza a mineralização hipógena como representada pelos minerais: pirita, calcopirita e hematita e em menor quantidade bornita e calcosina. Também ocorrem, em superfície, processos supérgenos responsáveis pelo acúmulo de minério oxidado, composto de: calcosina, hematita, covelina, antlerita, brochantita, crisocola, malaquita, cobre nativo e cuprita. Os minerais de ganga primários são quartzo, barita, clorita

e calcita. Os minerais de ganga secundários são constituídos por produtos de alteração hidrotermal, tais como sericita, caulinita, clorita, limonita e pirita.

Durante as atividades de pesquisa desenvolvidas foram sugeridos para as Minas do Camaquã três modelos metalogenéticos: magmático hidrotermal, diagenético e epitermal.

O modelo magmático hidrotermal foi o primeiro a ser desenvolvido para explicar a gênese dos depósitos das minas do Camaquã. Este modelo teve maior aceitação depois do trabalho de Bettencourt (1972), onde sugere que o hidrotermalismo está relacionado à granitogênese neoproterozoica que teve sua colocação controlada por antigas falhas NW e EW reativadas pela orogênese do Cinturão Dom Feliciano (Fragoso Cesar 1980). Estas estruturas reativadas teriam servido como condutos para os fluidos hidrotermais mineralizantes. Este modelo logo foi abandonado, embora Beckel (1990) o tenha retomado para as Minas do Camaquã (tipo pórfiro), não tendo muita aceitação por outros autores (e.g. Laux *et al.* 2000).

Com base no mapa geotectônico regional elaborado por Ribeiro & Carraro (1971), Bettencourt (1972) relacionou as falhas NW e EW como subsidiárias das falhas de direção NNE pertencentes ao “Sistema Irapuá”. De acordo com as características das estruturas Bettencourt (1972) interpretou que a origem mecânica dos falhamentos foi submetida a um esforço de compressão local, apresentando esforço principal ( $\sigma_1$ ) essencialmente vertical com  $\sigma_3$  na direção NE/SW e  $\sigma_2$  na direção NW/SE. Esta interpretação é contrária à interpretação de Almeida (2005) que descreve para este evento  $\sigma_2$  vertical,  $\sigma_1$  na direção NW/SE e  $\sigma_3$  na direção NE/SW. Porém, é importante ressaltar que em 1972, ano de publicação da tese de doutorado de Bettencourt, relacionava-se  $\sigma_1$  como esforço estritamente gravitacional, sempre ocorrendo na vertical,  $\sigma_2$  como estritamente esforço compressional e  $\sigma_3$  estritamente como componente tracional.

Posteriormente, o modelo diagenético foi desenvolvido para explicar a metalogênese das minas do Camaquã. Alguns autores (e.g., Badi & González 1988; Teixeira & González 1988), utilizaram como base de interpretação a granulação fina do minério e as observações de controles estratigráfico e litológico das mineralizações, sendo estas concordantes com as estruturas sedimentares. Para este modelo os filões seriam provenientes da remobilização dos sulfetos por um intenso fraturamento que afetou a área e possibilitou para que parte do minério disseminado fosse remobilizada, originando a mineralização filoneana.

Bettencourt (1976) revisou suas considerações tomadas em seu doutorado acerca da metalogênese do depósito. Baseou-se principalmente nos resultados decorrentes dos estudos de inclusões fluidas em baritas que apresentaram caráter essencialmente aquoso, pequena densidade das inclusões fluidas, baixa salinidade (8 a 10% em peso equivalente de



NaCl), baixa temperatura de homogeneização e baixos valores de  $\delta^{18}\text{O}$ . Também se baseou em resultados da composição dos isótopos estáveis de oxigênio e enxofre, que é caracterizada por desequilíbrio do enxofre durante a deposição hidrotermal evidenciado pelo comportamento dos  $\delta^{34}\text{S}$  das baritas que, segundo o autor, é peculiar em depósitos rasos.

Relacionou, então, o jazimento das Minas do Camaquã ao modelo de hidrotermalismo epitermal, descartando a possibilidade de a mineralização estar vinculada a uma origem profunda. Neste trabalho o autor ainda ressalva, “apesar da impossibilidade atual de se determinar  $[\delta^{34}\text{S}_{\Sigma}]$  dos fluidos hidrotermais, os valores do  $\delta^{34}\text{S}$  dos sulfetos hipógenos parecem indicar uma origem profunda do enxofre, provavelmente do manto superior ou relacionado a uma fonte magmática (magma silicatado ou lixiviação de sulfetos de rochas ígneas) o que de nenhum modo significa que os elementos metálicos tenham a mesma origem”.

No final da década de 90 o modelo sedimentar passou a ser questionado pelo corpo técnico da Companhia Brasileira do Cobre, pois de acordo com este modelo, a mineralização estaria restrita aos níveis mais rasos e, deste modo, tornar-se-ia inviável a prospecção deste metal em profundidades elevadas. Uma das principais características da mineralização que embasava este questionamento feito pela CBC era de que nos níveis profundos o seu controle era dado predominantemente por estruturas e subordinadamente disseminado. Neste sentido, alguns autores (e.g. Laux et al. 2000) passaram a adotar o modelo epitermal para explicar a metalogênese, relacionando a mineralização a profundidades rasas, e considerando a participação de água meteórica nos fluidos mineralizantes, concordando com Bettencourt (1976).

Teixeira & Gonzalez realizaram no ano de 1988 um estudo pelo DNPM com o objetivo de compilar informações sobre o jazimento das Minas do Camaquã e, dentre os aspectos de controle e origem da mineralização, consideraram que o primeiro controle de formação do minério foi litológico, principalmente devido às informações disponíveis sobre a ocorrência de minério disseminado da Jazida Santa Maria (Pb-Zn). E concluem que os elementos metálicos provavelmente introduzidos junto com o material detrítico, formador dos leques deltaicos, cristalizaram como sulfetos em locais favoráveis na bacia. De acordo com os mesmos autores, entre as evidências de origem diagenética para estes depósitos estão:

“a) Presença de sulfetos entre os grãos detríticos de quartzo e seu crescimento autigênico; b) Disseminações finas de sulfetos sem relação com falhamentos; c) Presença de sulfetos em clastos de conglomerados intrafoliais onde a matriz é estéril (Jazida Santa Maria); d) Concentrações locais de sulfetos em estruturas diagenéticas e e) Zoneamento do minério relacionado à fácies sedimentar”. Os mesmos autores concluem que “o intenso

fraturamento que afetou a área propiciou condições para que parte desses sulfetos disseminados fosse remobilizada, originando a mineralização filoneana. A interseção de um nível disseminado, mesmo de baixo teor, com uma falha importante origina nesta uma zona de enriquecimento, o mecanismo responsável por esta remobilização, entretanto, não está perfeitamente conhecido até o momento”.

#### **4.4 Geofísica Aplicada à Prospecção Mineral**

As técnicas de interpretação de dados aerogeofísicos vêm sendo sistematicamente utilizadas na fase inicial de exploração mineral para auxiliar na delimitação de alvos exploratórios, nos trabalhos de campo e na confecção de mapas geológicos, principalmente na determinação de contatos litológicos e de lineamentos estruturais. O aumento da utilização destes dados está relacionado com o barateamento em sua obtenção, a facilidade de trabalhar com mapas em pequena escala e principalmente devido à modernização das ferramentas e da capacidade de processamento e integração de dados nos novos *softwares* geofísicos.

A extração de informações geológicas de um levantamento geofísico é conhecida como uma interpretação e pode ser realizada tanto num aspecto quantitativo como qualitativo.

Sendo o aspecto quantitativo caracterizado por envolver estimativas numéricas da profundidade e dimensões das fontes de uma anomalia, realizando uma modelagem teórica do corpo de interesse. Este modelo é então comparado com o modelo geológico previamente realizado e verifica-se a consistência dos parâmetros geofísicos obtidos com os geológicos observados. Os parâmetros do modelo geofísico são depois ajustados a fim de obter uma melhor concordância entre as anomalias calculadas e observadas.

O aspecto qualitativo está relacionado a informações geológicas e estruturais que apresentam anomalias evidentes. É muitas vezes utilizado para estender o conhecimento geológico de uma dada região em áreas onde não há nenhuma informação de afloramento, ou para estender as unidades mapeadas para a dimensão de profundidade (*i.e.* para ajudar a adicionar à terceira dimensão a geologia mapeada) (Reeves 2005).

##### **4.4.1 Magnetometria**

Segundo Soares (2001), desde o ano de 1540 a propriedade do campo magnético da Terra tem sido estudada, esta que provavelmente tem sua origem relacionada ao movimento de ferro parcialmente fundido na parte mais externa do núcleo terrestre, a mais de 2900 km abaixo da superfície terrestre. No entanto, somente em 1843 o pesquisador



Won Wrede usou as variações do campo para localizar depósitos de minério magnético e foi em 1879 com a publicação do livro *The examination of Iron Ore Deposits by Magnetic Measurements* por Talén que se deu início às atividades de geofísica aplicada, e até hoje esta prática vem passando por muitos avanços.

Ainda segundo este autor, a interpretação precisa de dados aeromagnéticos é comumente mais difícil do que interpretações de dados de outras técnicas geofísicas como, por exemplo, a gravimetria. Por outro lado, as medidas de campo magnético são facilmente realizadas e requerem menor recurso financeiro do que a maioria das outras técnicas.

A amostragem magnetométrica mede as variações no conteúdo de magnetita e outros minerais ferromagnéticos das rochas formadas em temperaturas abaixo do ponto Curie, pois estas causam variações no campo magnético terrestre. Anomalias magnéticas podem, assim, refletir as variações de composição e geometria de rochas da crosta terrestre não aflorantes. Anomalias magnéticas são, portanto, importantes fontes de evidências indiretas sobre a natureza dos domínios tectônicos da crosta terrestre.

O equipamento que mede a intensidade do campo magnético total de um local é chamado magnetômetro que, de uma maneira geral, consiste em um sensor preenchido por hidrocarboneto líquido, que fica no topo de uma haste não magnética. Quando acionado o sensor é gerado um pulso magnético que força os núcleos de H (prótons) do hidrocarboneto se alinharem segundo este campo induzido conhecido. Quando o campo cessa os núcleos de H retornam às posições de origem, alinhando-se segundo o campo magnético da Terra. O aparelho indica a vibração dos átomos ao se alinharem ao campo, fenômeno chamado de ressonância magnética e assim, por meio de um leitor, mede a intensidade do campo magnético (Soares 2001).

As anomalias magnéticas possuem relação direta com a susceptibilidade magnética do material. Quanto maior a quantidade de minerais ferromagnéticos (pirrotita, titanomagnetita, maghemita, ferro nativo e essencialmente a magnetita), maior a resposta magnética, ou relevo magnético (Soares 2001). E quanto maior a extensão, comprimento, espessura, inclinação e latitude do corpo magnético, mais acentuado torna-se o relevo magnético. Assim, rochas sedimentares, exceto formações ferríferas, apresentam relevos magnéticos suaves, ou baixos magnéticos, enquanto que rochas ígneas com magnetita, por exemplo, produzem um relevo magnético acidentado nos mapas de contorno magnético. As rochas metamórficas podem apresentar todos os comportamentos magnéticos que possuem relação com a rocha que sofreu o metamorfismo.

"Anomalias magnéticas podem ser produzidas por uma série de feições, como mudanças litológicas, variação na espessura de unidades magnéticas, falhamentos,

dobramentos e relevo topográfico. Uma quantidade significativa de informações pode ser obtida da análise qualitativa de mapas de anomalia de campo magnético residual e regional. O mapa aeromagnético, quando interpretado, fornece informações básicas sobre as propriedades geofísicas da rocha, o qual pode auxiliar na interpretação geológica. Mapas interpretados mostram unidades magnéticas e não magnéticas, dobras e falhas que afetam certas rochas e diferenças entre o material ígneo, sedimentar e metamórfico” (Soares 2001).

#### 4.4.2 Gamaespectrometria

A aplicação da radioatividade na geociência tem como base o conhecimento das propriedades físicas das fontes para os elementos radioativos. Também é essencial o entendimento da relação de mobilidade e o decaimento radioativo entre estes elementos que são captados pelo espectro, para que seja feita uma correlação com a possível fonte natural. Os raios gama podem penetrar até 30 centímetros na rocha e em diversos metros no ar.

De acordo com IAEA (2003), cada fóton de raios gama tem uma energia discreta, e esta energia é uma característica do isótopo fonte. Esta energia discreta pode ser descrita como a onda de radiação gama ( $\gamma$ ) que é originada devido a uma instabilidade energética surgida no núcleo do isótopo fonte logo após a emissão de partículas *alfa* e *beta* durante o decaimento radioativo.

A partir deste evento, fundamentou-se a espectrometria de raios gama, processo geofísico que mede a energia dos fótons de raios gama, e por meio desta medição pode ser delimitado às fontes da radiação.

Fontes naturais de radiação derivam de radioisótopos sintetizados durante a criação do sistema solar e devido às longas meia-vidas dos elementos radioativos, eles ainda existem hoje. Destes, potássio ( $^{40}\text{K}$ ), urânio ( $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  e seus filhos), tório e ( $^{232}\text{Th}$  e seus filhos) são os únicos radioisótopos, que produzem raios gama de alta energia com intensidade suficiente para serem usados para o seu mapeamento.

Os detectores de energia discreta, causada pela liberação de partículas *alfa*, mais comumente utilizados nos levantamentos de radioelementos naturais, são os cristais de cintilação de iodeto de sódio ativado com Tálio.

Os radio elementos têm sua origem relacionada às rochas ácidas, estando o potássio presente principalmente nos feldspatos potássicos (ortoclásios e microclínios podem apresentar até 13% de potássio), e micas (biotita e muscovita são compostas por aproximadamente 8% de potássio). Uma de suas características principais é a sua comum ocorrência em ambientes que sofreram hidrotermalismo (Shives *et al.* 2001). Durante o

intemperismo, os minerais potássicos são quebrados na ordem biotita, feldspato potássico e muscovita e tendem a concentrar-se como argilas ricas em illita e montmorilonitas (Dickson & Scott 1997).

O urânio pode ocorrer na superfície terrestre como forma oxidada em silicatos, como por exemplo, uraninita e uranotorita e em minerais primários de urânio, como a monazita, xenotímio e zircão. O urânio ao sofrer quebra, devido ao intemperismo, pode ser retido em óxidos de ferro autigênico e argilominerais, ou então precipitado sobre condições redutoras, formando depósitos de urânio em condições favoráveis. O urânio, por si só não, emite raios gama durante o seu decaimento e, possivelmente por este motivo, a sua imagem aérea é bastante “poluída” (Dickson & Scott 1997).

O tório é bastante raro na natureza e instável em ambiente aquoso (Boyle 1972). Assim, este elemento é caracterizado por não ocorrer em ambientes que sofreram hidrotermalismo (Shives *et al.* 2001). O tório pode estar presente em allanita, monazita, xenotímio e zircão a níveis maiores do que 1000 ppm ou como elemento traço nos minerais principais. São extremamente estáveis durante o intemperismo e podem acumular-se em minerais pesados nos depósitos de areia. O tório liberado pelo intemperismo pode ser retido em minerais hidratados ou oxidados à base de Fe ou Ti e em argilas (Dickson & Scott 1997).

A gamaespectrometria é comumente aplicada à prospecção de depósitos de metais. Como exemplo de sucesso pode ser citado Dickson & Scott (1997) que aplicaram a gamaespectrometria para a obtenção de uma assinatura no depósito de ouro epitermal em Birrumba, a nordeste de Queensland na Austrália e mostraram que a principal variação ocorre nos conteúdos de Th e K da região. Obtiveram, com base nos mapas gamaespectrométricos, uma resposta geofísica da assinatura de depósitos epitermais de ouro, caracterizada pela alteração mineral vista em planta.

Shives *et al.* (2001) integraram informações relevantes com respeito a casos de prospecção de metais base que possuem assinatura gamaespectrométrica, e constataram a partir deste estudo que o radio elemento potássio sempre acompanha eventos hidrotermais que formam depósitos de cobre e, contrariamente ao potássio, o elemento tório geralmente não acompanha eventos de alteração hidrotermal. Neste sentido, a razão K/Th fornece uma excelente distinção entre o potássio associado à alteração hidrotermal e o potássio associado à variação litológica normal, bem como o potássio concentrado devido ao intemperismo. Assim, pode-se delimitar zonas afetadas por hidrotermalismo quando ocorrem altas razões de K/Th.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este projeto teve duas etapas principais de metodologia, sendo a primeira caracterizada pelo processamento e micronivelamento dos dados aerogeofísicos gamaespectrométricos e magnetométricos e uma segunda etapa distinguida pela interpretação qualitativa dos mapas aerogeofísicos.

Inicialmente, como um primeiro passo deste trabalho, foi realizada a solicitação dos dados aerogeofísicos para a CPRM – Serviço Geológico do Brasil – responsável pela aquisição destes. Após a chegada dos dados brutos foi iniciada a etapa de processamento, tratamento e micronivelamento dos dados aerogeofísicos por meio da utilização de filtros que garantissem a eliminação da maior quantidade de ruídos aliada com a maior preservação das informações geológicas. A etapa de processamento foi realizada com o uso do *software Geosoft Oasis Montaj*, versão 7.1 acessado no Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo.

No Quadro 01 são apresentados os dados do aerolevanteamento do projeto geofísico Camaquã Área 1.

Quadro 01. Características do aerolevanteamento do projeto geofísico Camaquã Área 1 (CPRM, 1995).

Métodos	Magnetometria e gamaespectrometria
Limites aproximados	Lat (min/max): -31°30' / -29°30' Long (min/max): -54°45' / -52°15'
Número de áreas	1
Época do levantamento	16/06/1972 - 07/05/1973
Aeronave utilizada	Douglas DC-3
Magnetômetro	Geometrics G-803
Gamaespectrômetro	<i>Texas Instruments</i> (não é mencionado o modelo)
Volume dos cristais detectores	2.363,29 polegadas cúbicas (iodeto de Na ativado por TI)
Total de perfis (distância)	36.763 km
Total de perfis (linhas)	836
Intervalo (amostragem)	1s
Altura do voo	150 m
Área total	33.906 km <sup>2</sup>
Direção das linhas de vôo	NW-SE
Espaçamento entre linhas	1 km

## **5.1 Processamento dos Dados**

O processamento dos dados aerogeofísicos foi inteiramente realizado no programa *Geosoft Oasis Montaj*.

O processo realizado para o tratamento dos dados, bem como os filtros utilizados foram minuciosamente escolhidos e testados objetivando atingir uma combinação que aliasse a eliminação da maior quantidade de ruídos com a menor perda de informações geológicas (“alias” espacial). Todos os filtros utilizados nesta etapa de trabalho estão presentes na estrutura do programa *Geosoft Oasis Montaj*.

No item 7 deste trabalho (Resultados Obtidos) é explicado o processo de trabalho adotado e expostos os parâmetros definidos para o micronivelamento.

## **5.2 Produtos Gerados a partir dos Dados Geofísicos Processados**

Posteriormente à etapa de processamento e tratamento dos dados, foram realizadas razões entre os canais de gamaespectrometria e aplicados filtros nos dados aeromagnetométricos, objetivando a geração de produtos, *i.e.* mapas geofísicos, que realçam informações relevantes acerca da metalogênese de metais base da área em questão.

### **5.2.1 Produtos dos Dados de Campo Magnético Total**

Nesta etapa, os filtros aplicados aos dados de campo magnético total visam separar o sinal em diferentes formas e profundidades. Para os dados micronivelados foram aplicados, com o uso do *software Geosof Oasis Montaj*, filtros que geraram mapas de primeira e segunda derivadas verticais, primeiras derivadas horizontais (X e Y), sinal analítico e deconvolução de Euler.

#### **5.2.1.1 Derivadas**

As derivadas são comumente aplicadas ao dado do campo magnético total, com a finalidade de realçar as altas frequências de onda ressaltando as componentes de fontes rasas por meio da eliminação das componentes de fontes intermediárias (Whitehead *et al.* 2007). Aplicam-se, então, as derivadas no sentido X,Y (horizontais) e Z (vertical), para realçar as estruturas rasas que ocorrem nestes sentidos.

A aplicação da segunda derivada horizontal em Z realça ainda mais as componentes das fontes rasas, eliminando com maior intensidade as outras componentes de origem profunda. O uso desta ferramenta é de extrema valia para a interpretação dos limites litológicos, falhas e zonas mineralizadas (Soares 2001).

### **5.2.1.2 Sinal analítico**

A amplitude do sinal analítico tem como vantagem não depender dos parâmetros do campo magnético terrestre e da direção de magnetização remanescente (Soares 2001), computando apenas as derivadas do campo (X, Y e Z).

O mapa de sinal analítico é utilizado com o objetivo de obter a localização das fontes magnéticas, bem como os seus contatos e lineamentos.

### **5.2.1.3 Campo magnético total por sombreadamento**

Os mapas de campo magnético total por sombreadamento e tons de cinza realçam os detalhes relacionados a fontes mais rasas e melhor definem os domínios geológicos.

### **5.2.1.4 Deconvolução de Euler 2D**

De acordo com Oliveira (2005) o algoritmo de deconvolução Euler 2D foi desenvolvido com intuito de estimar de forma semi-quantitativa as profundidades de fontes magnéticas ou de corpos magnéticos. A técnica foi desenvolvida por Thompson (1982) que se baseia na equação diferencial homogênea de Euler, considerando as coordenadas cartesianas x, y, z e o sinal analítico.

## **5.2.2 Produtos dos Dados Gamaespectrométricos**

### **5.2.2.1 Ternário**

O mapa ternário apresentado representa a composição dos canais de K, Th e U, e auxilia a caracterizar as proporções de ocorrências destes elementos.

### **5.2.2.2 Razões entre os elementos radiométricos**

Os mapas de razão entre os elementos radiométricos são de grande importância para uma fase de interpretação para, principalmente, distinguir zonas anômalas destes elementos devido a eventos hidrotermais ou ao intemperismo. Neste sentido, foram gerados mapas com as razões dos canais gamaespectrométricos. Contudo, levou-se em conta durante o cálculo de razão que quando há ocorrência de valores de K, Th e U negativos ou muito próximos a zero, tanto no denominador como numerador, causam inconsistências nos índices calculados, e por consequência, nos mapas de razões (IAEA 2003).

Para solucionar tal problema realizou-se uma adaptação no procedimento sugerido por Grant (1998) que sugere a substituição dos valores igual ou muito próximos a zero pelo valor que equivale a 5% da média da população. No presente trabalho valores iguais ou muito próximos a zero de U, K e Th foram substituídos pelo valor mínimo correspondente a 3% da respectiva média. Os intervalos de *dummies* (ausência de valor) foram preservados.



### 5.3 Interpretação dos Mapas Geofísicos

Tendo como principal proposta deste trabalho a verificação de assinatura aerogeofísica (gamaespectrométrica e magnetométrica) da ocorrência de metais base na Bacia do Camaquã e a delimitação de alvos exploratórios, foi concentrada grande parte do tempo em revisão bibliográfica. Foram consultados trabalhos que abordassem temas relacionados aos eventos de formação e deformação da Bacia do Camaquã, características litoestratigráficas, mineralógicas e estruturais da bacia, modelos metalogenéticos das ocorrências de metais base nas Minas do Camaquã e de que forma estes modelos se aplicam a outros depósitos de metais base. Por fim, uma ampla revisão bibliográfica em trabalhos aerogeofísicos magnetométricos e gamaespectrométricos que tem como proposta a verificação de assinaturas geofísicas para a ocorrência de metais base.

A etapa de interpretação permitiu que fosse obtida uma assinatura aerogeofísica que pudesse apontar para a ocorrência destas mineralizações. Assim, foi possível realizar a identificação e delimitação de alvos exploratórios favoráveis às ocorrências de metais base na Bacia do Camaquã, conforme abordado no item 7 – Resultados Obtidos.

Os programas computacionais utilizados nesta etapa de trabalho foram o programa *Geosoft Oasis Montaj 7.1* e o programa *ArcGIS 9.3*, este último com a finalidade principal de vetorizar mapas geológicos disponíveis na literatura.

## 6. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para o desenvolvimento deste trabalho foi fundamental o treinamento com o *software Geosoft Oasis Montaj*. Por meio deste programa computacional foi realizado o tratamento dos dados aerogeofísicos e gerados os mapas que embasaram todo o processo de interpretação.

Para a realização do micronivelamento dos dados aerogeofísicos foi necessário o bom entendimento dos principais processos de tratamento para estes dados, bem como os filtros utilizados e o entendimento dos parâmetros a serem aplicados para cada. Também foram estudados trabalhos com assuntos relacionados aos principais produtos aerogeofísicos, derivados dos dados de gamaespectrometria e magnetometria, que frequentemente são utilizados para embasarem interpretações cujo enfoque é a prospecção mineral.

O entendimento da metalogênese do Distrito Cuprífero de Camaquã e da formação da Bacia do Camaquã, bem como os controles das mineralizações foram fundamentais para cumprir com a proposta deste trabalho.

Neste contexto, foi realizada extensa revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados à origem da Bacia do Camaquã, aos modelos metalogenéticos propostos para o Distrito Cuprífero de Camaquã e às respostas aerogeofísicas que conseguissem realçar propriedades físicas peculiares dos modelos metalogenéticos e dos controles das mineralizações.

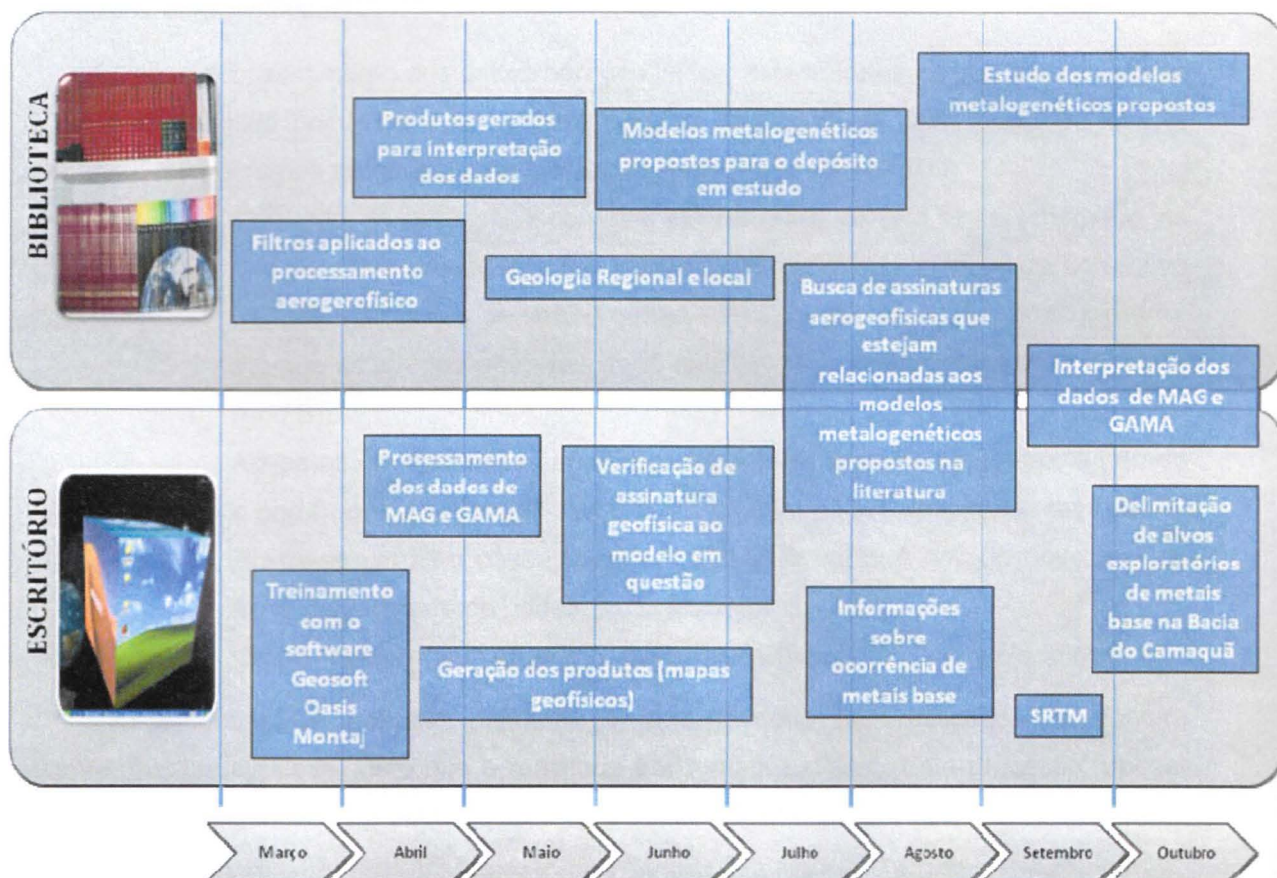
O Quadro 02 demonstra o cronograma das atividades realizadas durante este trabalho.

Quadro 02 – Cronograma das atividades realizadas no trabalho de formatura.

	2010									
	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA										
TREINAMENTO COM SOFTWARE										
PROCESSAMENTO DOS DADOS										
ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO DE PROGRESSO										
INTERPRETAÇÃO DOS DADOS										
ELABORAÇÃO DA MONOGRAFIA										
ELABORAÇÃO DA APRESENTAÇÃO PARA BANCA										

O Quadro 03 exprime detalhadamente os trabalhos de levantamento bibliográfico (biblioteca) e os trabalhos relacionados aos programas computacionais (escritório) pelo tempo, ou evolução nos trabalhos.

Quadro 03 – Principais trabalhos realizados durante o trabalho de formatura





## 7. RESULTADOS OBTIDOS

Este trabalho contou com dois principais resultados, sendo o primeiro obtido durante a etapa de processamento e micronivelamento dos dados aerogeofísicos, bem como os filtros e parâmetros utilizados no tratamento.

O segundo resultado foi obtido durante a etapa de interpretação dos dados, e corresponde à assinatura aerogeofísica gamaespectrométrica e magnetométrica obtida para a prospecção de metais base na Bacia do Camaquã. Como consequência deste resultado foram delimitados, na Bacia do Camaquã, alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base.

### 7.1 Processo de Trabalho, Filtros e Parâmetros Definidos para o Tratamento dos Dados

Durante a fase inicial deste trabalho foi dada ênfase ao processamento dos dados aerogeofísicos de gamaespectrometria e magnetometria, objetivando obter bons produtos que seriam utilizados como base para a etapa de interpretação dos dados, garantindo assim, que a proposta deste trabalho fosse cumprida de maneira eficaz.

São expostos a seguir a metodologia e os parâmetros utilizados para o tratamento dos dados aerogeofísicos.

Para o processamento dos dados aerogeofísicos, este trabalho adotou-se como base o processo definido por Minty (1991). Com isso, foi realizado em cada canal (K, U, Th, contagem total e campo magnético total), o seguinte processo de trabalho:

- i) Correção de qualquer inconsistência no dado do *grid* bruto (chamado de *grid* A). Este processo é um nivelamento preliminar através de correções DC-shift nas linhas de voo, o qual é realizado por meio de tentativa e erro, até que se chegue a um resultado satisfatório e então gerada um novo *grid* (*grid* B);
- ii) Aplica-se um filtro passa alta no canal editado (*grid* B). Com isso, é gerado o *grid* C, que deve conter somente as anomalias que desejamos remover;
- iii) Aplica-se um filtro passa baixa no *grid* C, e então é gerado novo *grid* de filtro, denominado de *grid* D;
- iv) O *grid* D é subtraído do *grid* B, gerando então o *grid* micronivelado (*grid* E).

O processo de trabalho definido no item i) deve ser realizado de maneira extremamente cautelosa, visto que é realizado por tentativa e erro. Este processo, apesar de apresentar algum risco à informação original, é necessário para o tratamento dos dados

geofísicos do Projeto Camaquã Área I, por se tratarem de dados antigos e por isso apresentarem elevado grau de imperfeição, principalmente ao longo das linhas de voo.

Após o término do tratamento do item i) é gerado o *grid* B. Neste segundo *grid* foram passados dois filtros passa alta ("*Butterworth filter*" e "*Directional cosine*"). Esses filtros extraem os ruídos do *grid* B e os enviam para um *grid* de erros (*grid* C).

Para a extração dos ruídos foi escolhido o filtro "*Butterworth*", pois ele não somente rejeita completamente as frequências indesejadas, como também as suaviza (Butterworth 1930), gerando um *grid* de erro (*grid* C) já suavizado.

Foi escolhido o filtro "*directional cosine*", pois este elimina os ruídos do *grid* numa direção determinada. No conjunto de dados do Projeto Camaquã Área I os ruídos mais fortes estão na direção da linha de voo, e por este motivo, aplicou-se este filtro nesta direção (NW-SE).

Os parâmetros utilizados em cada filtro foram determinados por tentativa e erro, buscando uma combinação que aliasse a eliminação da maior quantidade de ruídos com a menor perda de informações geológicas ("*alias*" espacial).

A seguir, a especificação dos parâmetros utilizados no processamento dos canais magnetométricos e gamaespectrométricos:

- "*Butterworth filter*":

O filtro "*Butterworth*" foi aplicado como um filtro passa alta. O *cutoff* de ciclos por metro foi de 8.000 (correspondendo a 8 vezes a distância entre as linhas de voo). A ordem do filtro foi igual a 15, que, pouco suaviza as frequências retidas, porém suaviza bastante as frequências passantes que irão compor o *grid* de erro.

- "*Directional cosine*":

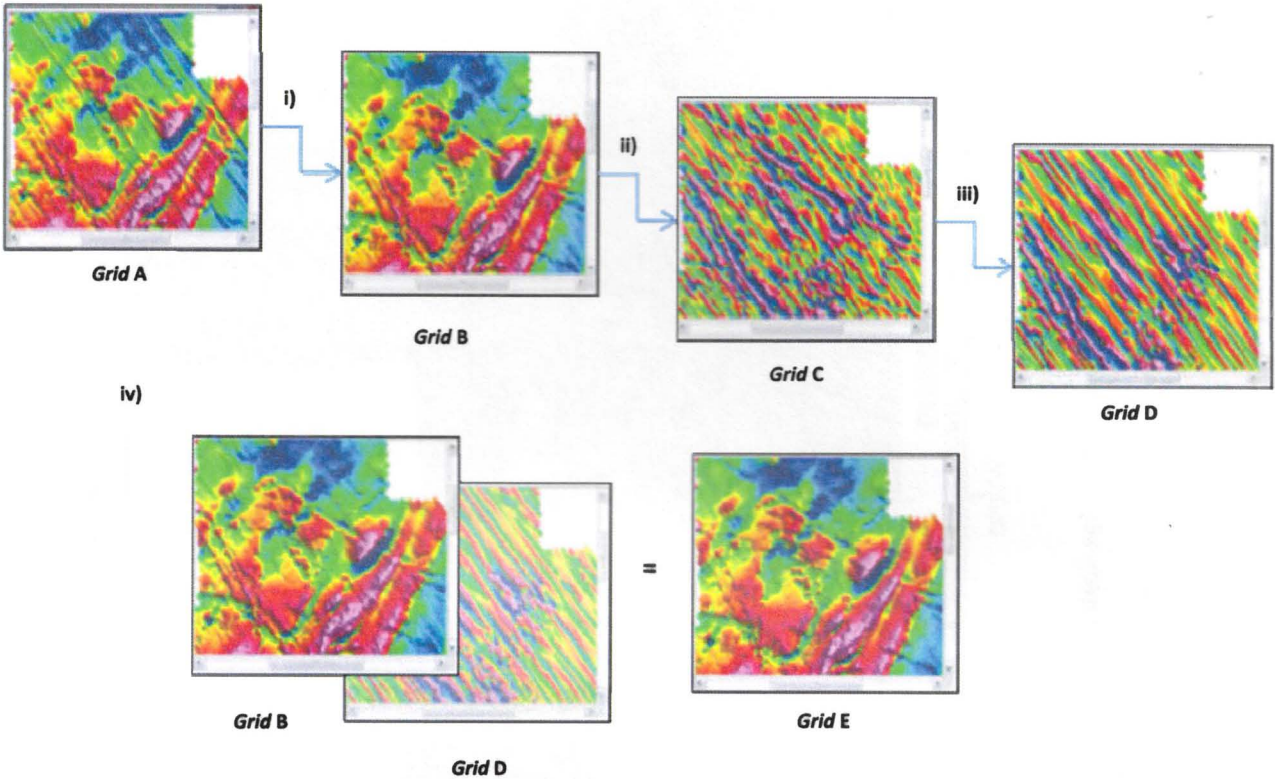
Aplicado na direção das linhas de voo (315°) e grau da função cosseno igual a 0.8.

O *grid* C, produto gerado pela aplicação dos filtros de passa alta é, na realidade, um *grid* de erro, e que de acordo com o fluxo de Minty (1991) deve ser subtraído do *grid* B. No entanto, no processamento destes dados o *grid* C extraiu muita informação geológica, o que levou a optar-se pelo incremento de um passo ao processo de trabalho, passando no *grid* C um filtro passa baixa com *cutoff* de comprimento de onda de 200 fiduciais, valor obtido por tentativa e erro.

Por meio deste passo, foi gerado um *grid* de erro atenuado (*grid* D) que, apesar de reter menos ruídos, considerou maior volume de informação geológica.

Por fim, foi gerado o *grid* micronivelado (*grid* E), que é resultado da subtração do *grid* de erro filtrado (*grid* D) do *grid* editado (*grid* B).

A Figura 02 esquematiza o processo descrito anteriormente.



**Passo considerado inconsistente se aplicado aos dados do Projeto Camaquã (Área I) :**

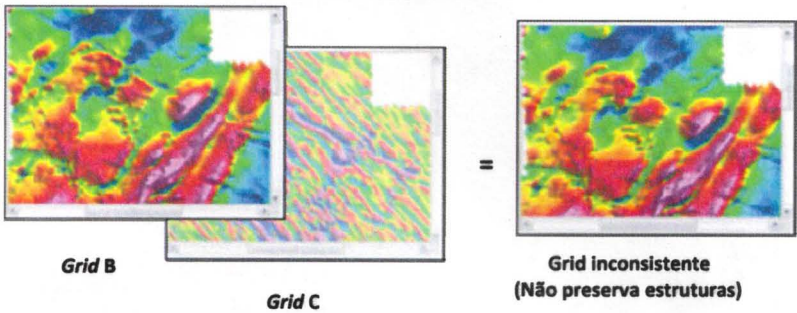


Figura 02. Esquema do processo de micronivelamento dos dados.

Como exemplo do resultado da eficácia do processamento adotado é apresentada a Figura 03 com o *grid* do canal do campo magnético total bruto (*grid* A) e o *grid* do campo magnético total micronivelado (*grid* E).



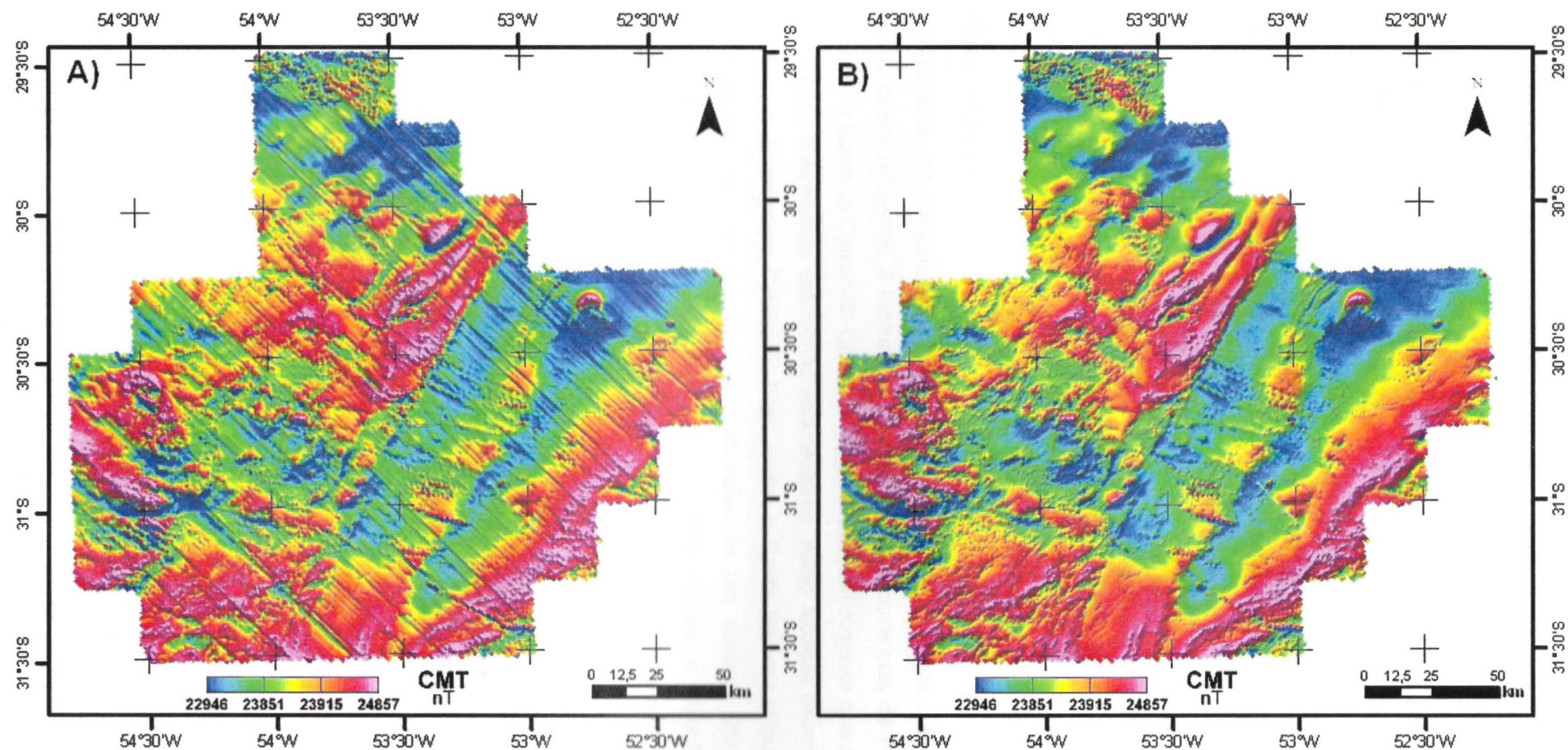


Figura 03. A) Mapa do canal do CMT (nT) antes do micronivelamento (inclinação: 45°; declinação: 45°; tamanho da célula do *grid*: 250 m). B) Mapa do canal do CMT (nT) micronivelado (inclinação: 45°; declinação: 315°; tamanho da célula do *grid*: 250 m).

## **7.2 Assinatura Aerogeofísica e a Delimitação de Alvos Favoráveis para as Ocorrências de Metais Base na Bacia do Camaquã**

Para a verificação de uma assinatura aerogeofísica de metais base na Bacia do Camaquã ponderou-se fundamentalmente as características peculiares dos modelos metalogenéticos e dos controles das mineralizações propostos na literatura do Distrito Cuprífero de Camaquã e, a partir das considerações observadas buscou-se verificar informações aerogeofísicas (gamaespectrometria e magnetometria) que as realçassem. Caracterizando, desta forma, uma assinatura aerogeofísica dos metais base (Cu-Pb-Zn) hospedados em sedimentos da Bacia do Camaquã.

Considerou-se então, por meio da revisão bibliográfica, que o primeiro controle de formação do minério foi litológico, seguindo o modelo diagenético. Num processo posterior houve intenso fraturamento na região, que propiciou condições para que parte dos sulfetos diagenéticos fosse remobilizada por meio de fluidos hidrotermais, seguindo o modelo hidrotermal epigenético.

Buscando obter informações da mineralização para o modelo diagenético foram levantados dados referentes à localização e aos tipos de ocorrências de metais base já catalogados na Bacia do Camaquã, CPRM (2004). Foi possível observar que as ocorrências de metais base hospedadas em rochas sedimentares, estão localizadas essencialmente em dois Grupos do Supergrupo Camaquã: Bom Jardim e Santa Bárbara (Figura 04). Desta forma, considerou-se neste trabalho, a existência de um controle litológico para a mineralização hospedada em sedimentos e por este motivo a seleção dos alvos exploratórios favoráveis a mineralização esteve restrita a estes dois grupos.



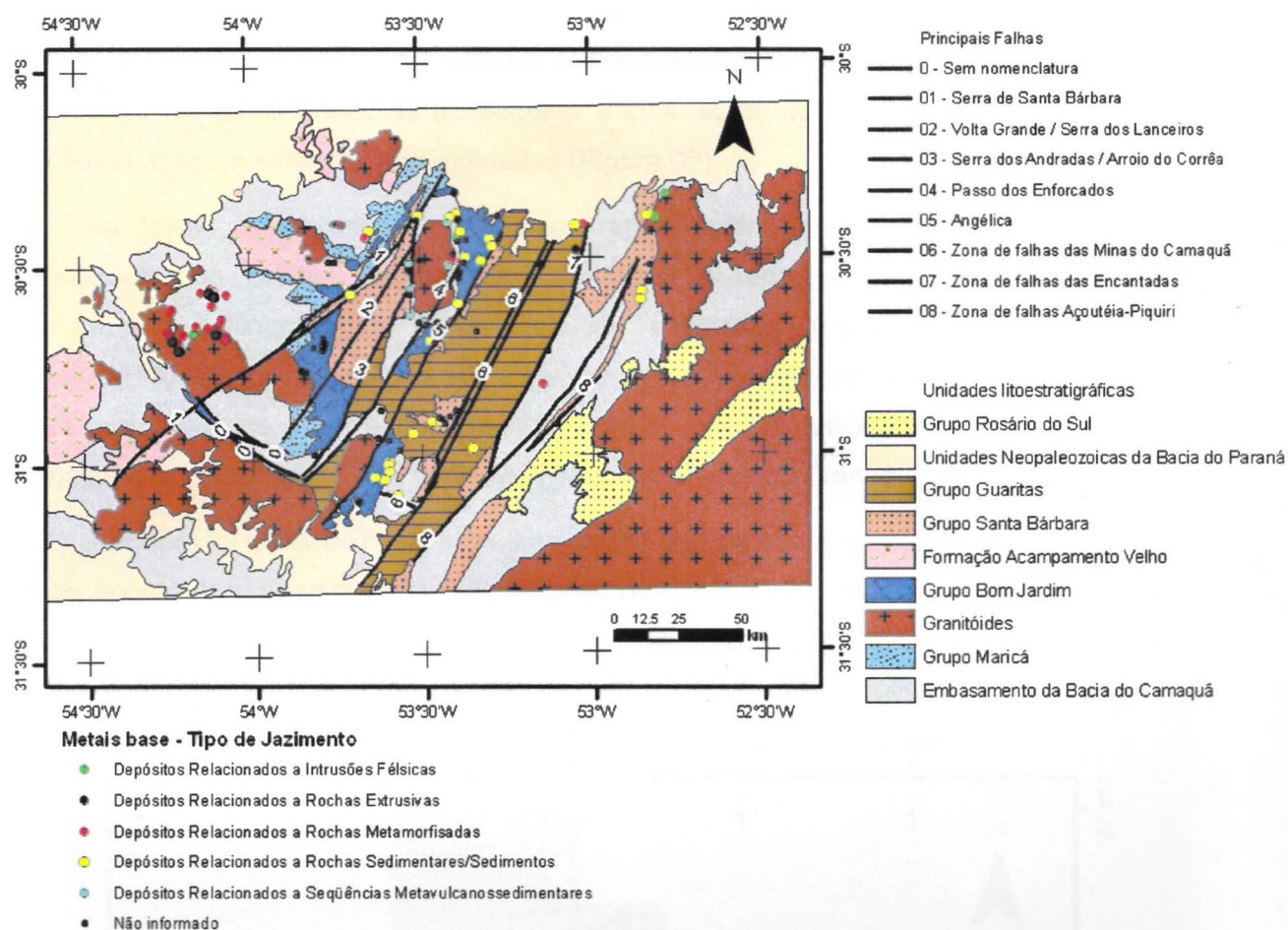


Figura 04 – Mapa geológico da Bacia do Camaquã com ocorrências de metais base. Modificado de Fragoso Cesar *et al.* (2000) e Almeida (2005).

Segundo Teixeira & Gonzalez, 1988 e Badi & Gonzalez 1988 a mineralização diagenética sofreu remobilização devido a um intenso fraturamento ocorrido na área, formando assim a minealização filoneana, entretanto estes autores citam que o mecanismo responsável por esta remobilização ainda não é perfeitamente compreendido. Para Bettencourt, 1976 a mineralização filoneana está relacionada à percolação de fluidos hidrotermais de origem rasa, associando deste modo, a mineralização do Distrito Cuprífero de Camaquã ao modelo hidrotermal epigenético.

Os autores Bettencourt 1972; Almeida 2005 relacionam o Sistema de Falhas Irapuá, definido por Ribeiro *et al.* (1966), como responsável por abrirem condutos que permitiram a percolação de fluidos hidrotermais, gerando então a remobilização dos sulfetos. Esta remobilização ocorreu principalmente nas falhas subsidiárias deste sistema que possuem direção principal WNW a NW e baixas profundidades, atingindo no máximo 600 metros. Estas falhas representam os principais controles estruturais da mineralização do Distrito Cuprífero de Camaquã.

Com o objetivo de destacar as propriedades físicas relacionadas aos controles estruturais das mineralizações foi utilizado o mapa aerogeofísico do campo magnético total para realçar as falhas principais do Sistema Irapuá, estas que possuem direção principal NNE e que atingem elevadas profundidades (Figura 05).

As falhas subsidiárias do Sistema Irapuá estão essencialmente associadas à mineralização do Distrito Cuprífero de Camaquã e representam o principal controle estrutural para a mineralização. Estas falhas são realçadas pelo mapa da primeira derivada na vertical do campo magnético total, devido principalmente ao fato de ocorrerem com baixas profundidades e por serem preenchidas por minerais ferromagnéticos, tais como a magnetita que ocorre associada à mineralização das Minas do Camaquã (Figura 06).

Também foi utilizado neste trabalho o mapa aerogamaespectrométrico da razão K/Th que de acordo com Shives, 2001 realça zonas que possam estar associadas a um evento hidrotermal, estas possíveis zonas de hidrotermalismo são representadas pelas cores quentes na figura 07.

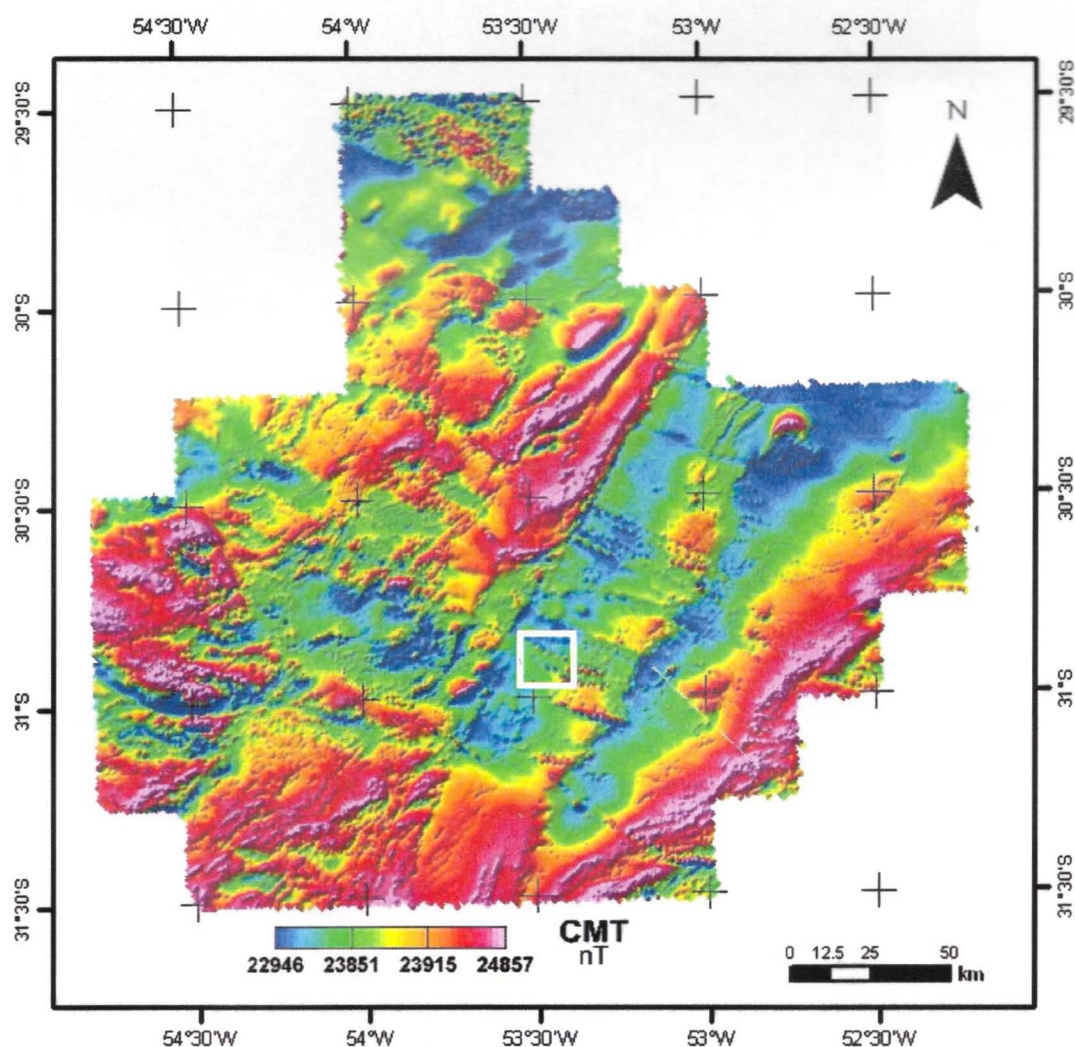


Figura 05 – Mapa aerogeofísico do campo magnético total. (O quadrado em tonalidade branca destaca a área das Minas do Camaquã).



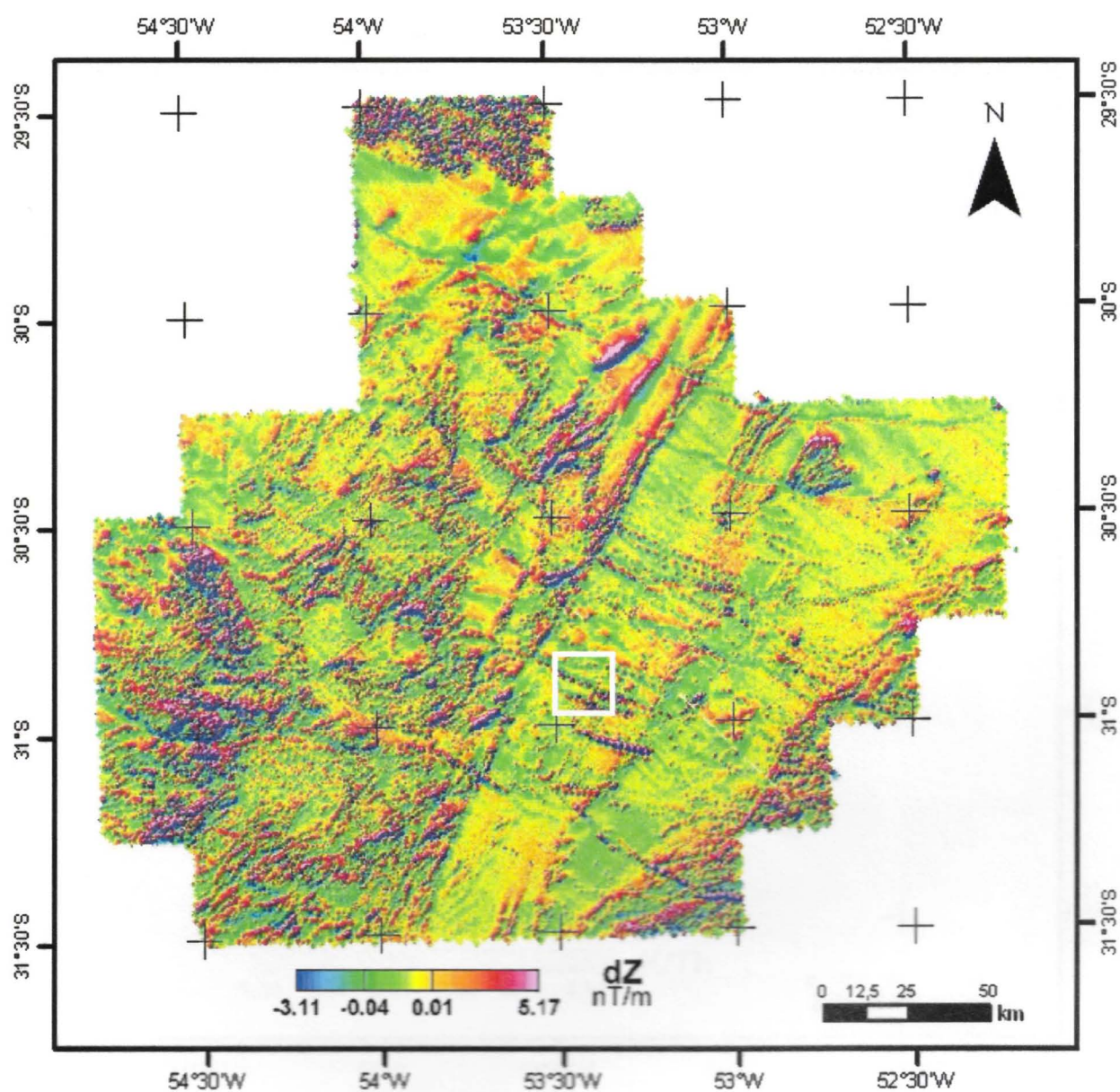


Figura 06 – Mapa aerogeofísico (magnetométrico) da primeira derivada na vertical. (O quadrado em tonalidade branca destaca a área das Minas do Camaquã).



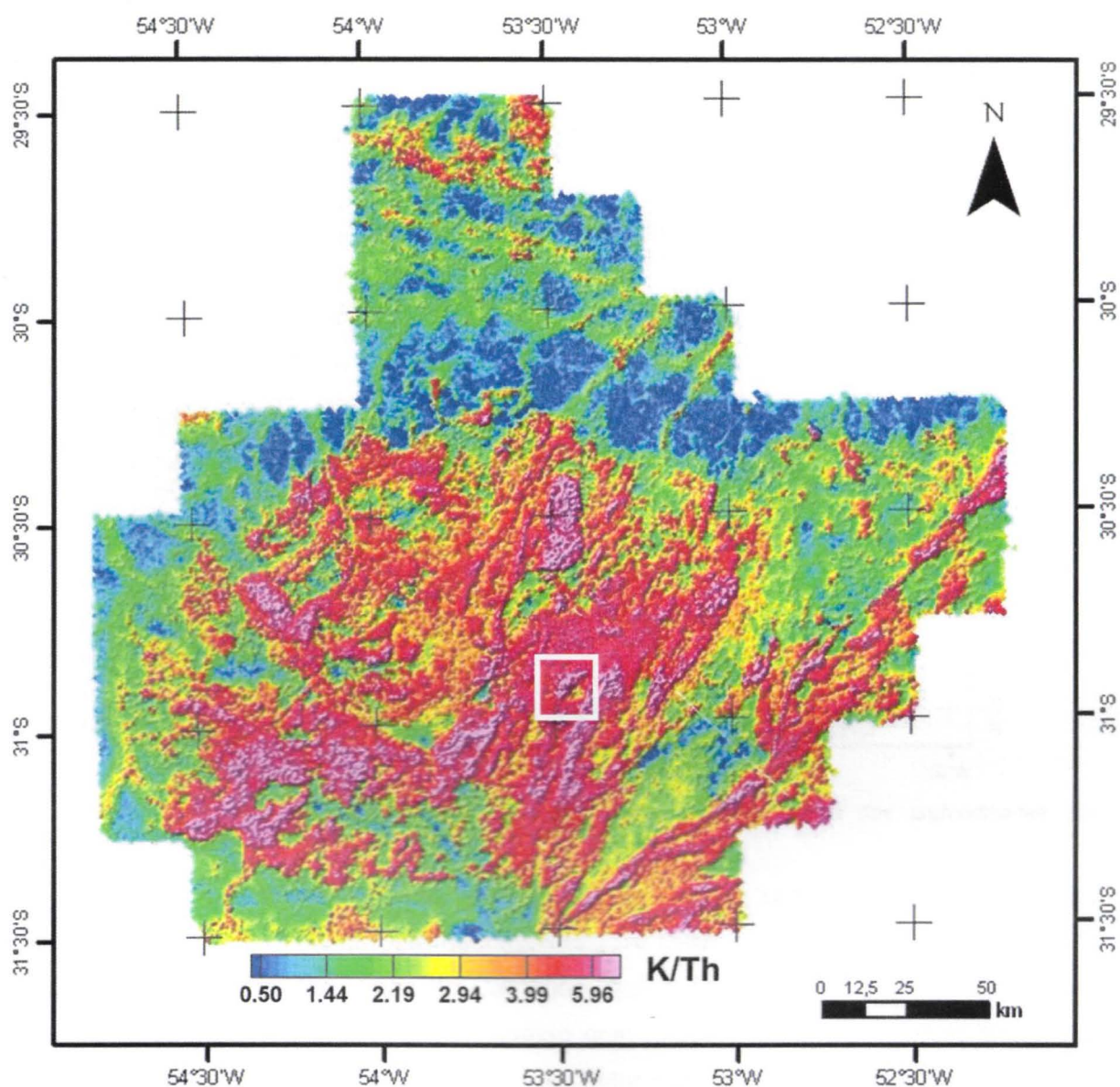


Figura 07 – Mapa aerogeofísico (gamaespectrométrico) da razão K/Th. (O quadrado em tonalidade branca destaca a área das Minas do Camaquã).

O mapa da deconvolução de Euler emprega um algoritmo nos dados de campo magnético total, das derivadas nas direções X, Y, Z e do sinal analítico, gerando um produto com uma análise semiquantitativa. Fornece, desta forma, informações sobre as profundidades dos lineamentos (Figura 08).

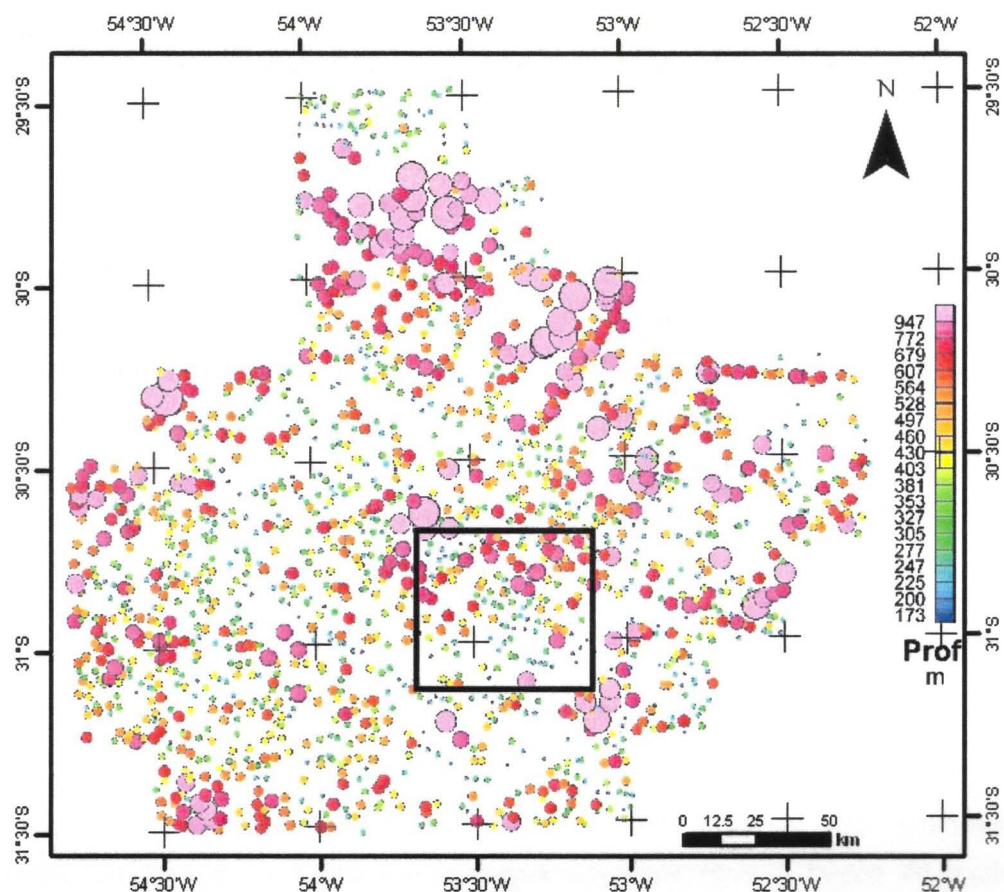


Figura 08 – Mapa da deconvolução de Euler (análise semiquantitativa das profundidades dos lineamentos da Bacia do Camaquã).

Considerou-se bastante eficaz este método de análise, uma vez que há correlação entre as profundidades obtidas pela deconvolução de Euler com a profundidade média da mineralização filoneana das Minas do Camaquã, que possuem filões mineralizados entre 200 a 550 metros de profundidade condizendo com dados obtidos pela deconvolução de Euler (Figura 09 – Mapa da deconvolução de Euler com zoom na região das Minas do Camaquã).

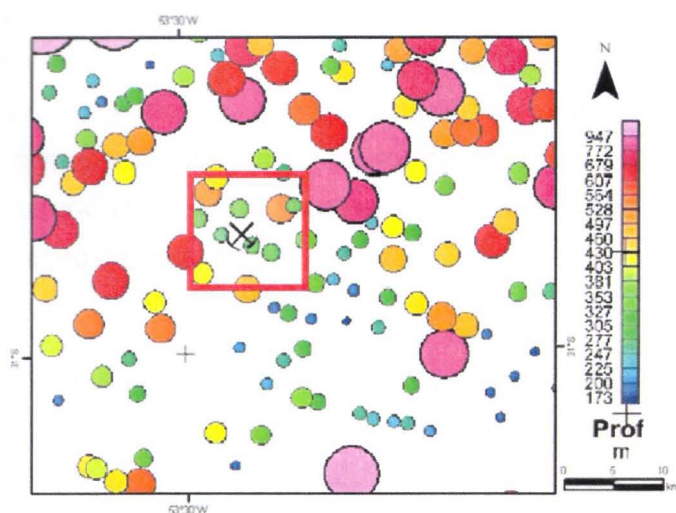


Figura 09 – Detalhe do mapa da deconvolução de Euler nas Minas do Camaquã.

No geral, para a obtenção da assinatura aerogeofísica de magnetometria e gamaespectrometria, da mineralização de metais base (Cu-Pb-Zn) do Distrito Cuprífero de Camaquã, foram considerados os mapas de:

a) Campo magnético total para a visualização de estruturas e rochas com contrastes magnéticos em profundidade; b) Composição ternária dos canais de K, Th e U para a diferenciação de rochas ácidas e básicas. Além do realce de zonas de falhas rasas que concentraram elementos radioativos, (e.g. Falha das Minas do Camaquã que limita a leste a janela estrutural do Grupo Santa Bárbara); c) Mapas das razões entre os elementos radioativos para definir se as zonas de concentrações destes elementos ocorrem segundo a sua natureza ou se ao intemperismo. O mapa da razão K/Th foi fundamental neste trabalho para definir as zonas relacionadas a eventos hidrotermais; d) Modelo digital de elevação (SRTM – sigla em inglês) que foi muito útil para auxiliar na definição de anomalias gamaespectrométricas causadas por intemperismo (zonas de baixo relevo, onde normalmente acumulam-se estes materiais); e e) Mapas das derivadas do campo magnético total em X, Y e Z para o realce de estruturas rasas.

Em suma, os parâmetros metalogenéticos e de controles das mineralizações relacionados ao Distrito Cuprífero de Camaquã adotados para a busca de assinatura geofísica foram:

- a) Mineralização com caráter diagenético, podendo ocorrer não somente no Grupo Santa Bárbara, como também no Grupo Bom Jardim que, assim como o primeiro, possui ocorrências de cobre hospedadas em rochas sedimentares (CPRM 2004).
- b) Posterior à formação do minério por diagênese, ocorreu evento compressivo na bacia que reativou falhas de direção NNE e formou subsidiárias de direção NW a WNW (Sistema de Falhas Irapuá) que serviu como conduto para a percolação de fluidos hidrotermais, concentrando, desta forma, os sulfetos nestas estruturas. A resposta geofísica empregada para realçar este evento foi o uso do mapa de razão K/Th cujas zonas de anomalia representadas podem estar relacionadas a eventos hidrotermais. Também foi utilizado o mapa da primeira derivada vertical do campo magnético total para realçar as falhas subsidiárias do Sistema Irapuá, estas que compõem o principal controle estrutural da mineralização do Distrito Cuprífero de Camaquã.

O quadro 04 expõe, de maneira simplificada, o processo de interpretação dos dados para obter a assinatura aerogeofísica da mineralização de metais base nas Minas do Camaquã.



Quadro 04 – Esquema do processo de interpretação dos dados aerogeofísicos.



Com o objetivo de facilitar o processo de delimitação de alvos exploratórios favoráveis à mineralização de Cu-Pb-Zn, foi gerado um mapa da composição dos dados da razão K/Th com os dados da primeira derivada vertical do campo magnético total. Deste modo, realçando a assinatura aerogeofísica para a mineralização das Minas do Camaquã em apenas um mapa. (Figura 10).

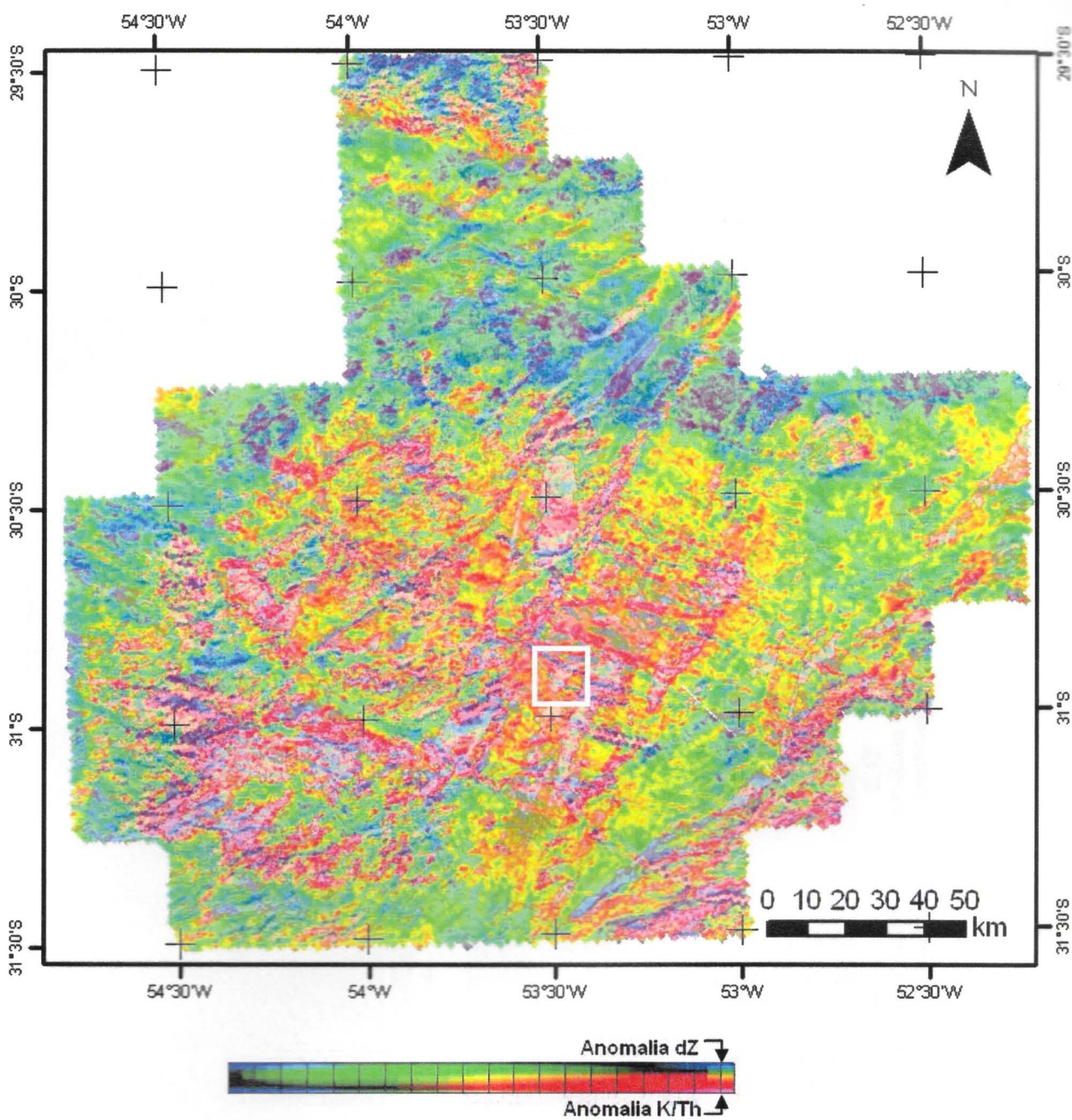


Figura 10 – Mapa da composição dos dados da razão K/Th e da primeira derivada em Z. (O quadrado em tonalidade branca destaca a área das Minas do Camaquã).

A distinção entre *background* e anomalia representados no mapa de composição dos dados da razão K/Th com os dados da primeira derivada na vertical do campo magnético total, foi realizada com base análise qualitativa na região das Minas do Camaquã, sendo assim verificada a assinatura aerogeofísica deste depósito.

Com base nos estudos dos controles das mineralizações e da obtenção da assinatura aerogeofísica (magnetometria e gamaespectrometria) das Minas do Camaquã pode-se então identificar e delimitar nove alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base hospedados em rochas sedimentares na Bacia do Camaquã (Figuras 11 a 13).



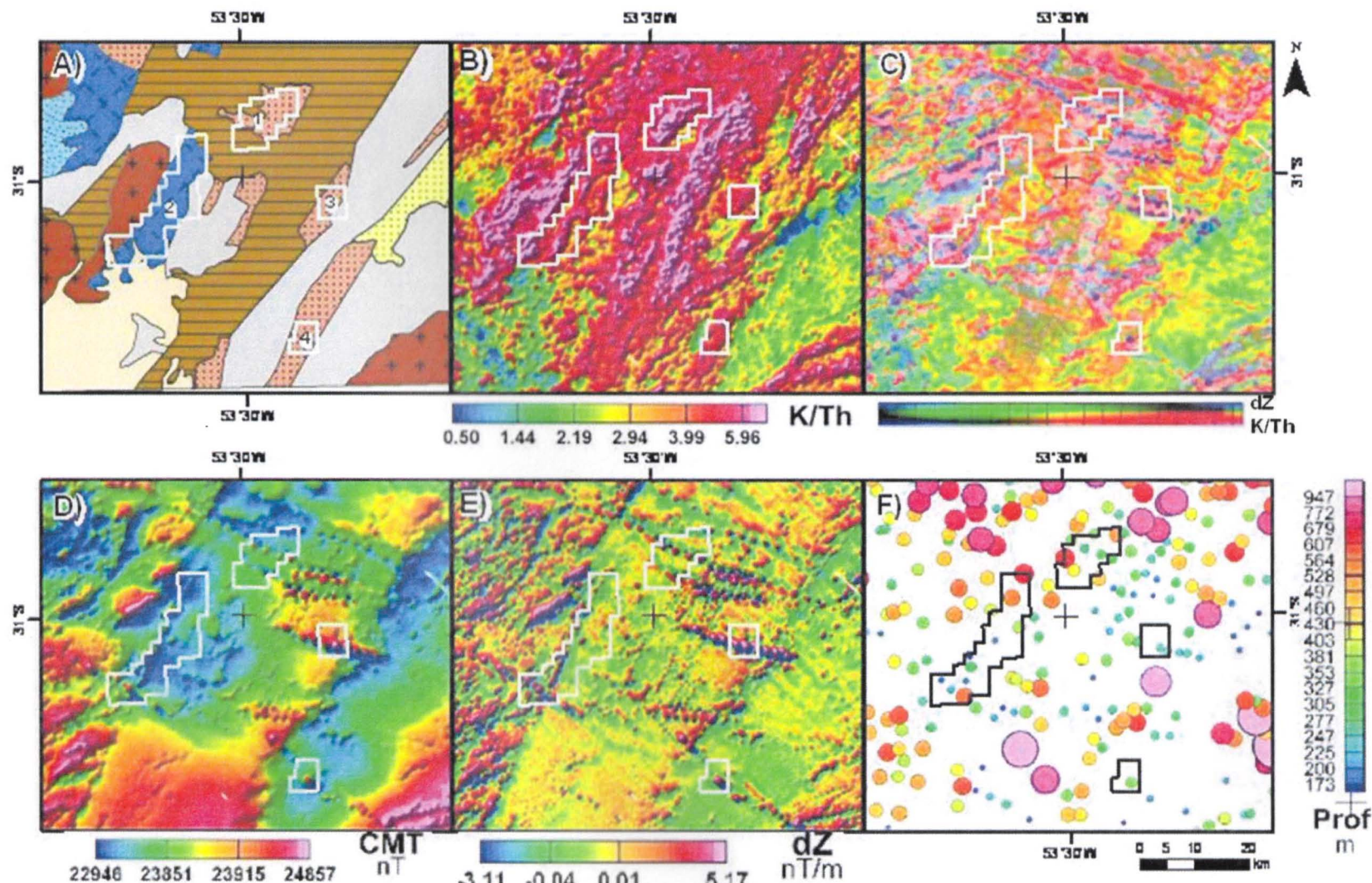


Figura 11 – Alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base delimitados na Sub-Bacia Camaquã Central. A) Mapa geológico. B) Razão K/Th. C) Composição da razão K/Th e primeira derivada em Z. D) Campo Magnético Total. E) Primeira derivada em Z. F) Deconvolução de Euler.



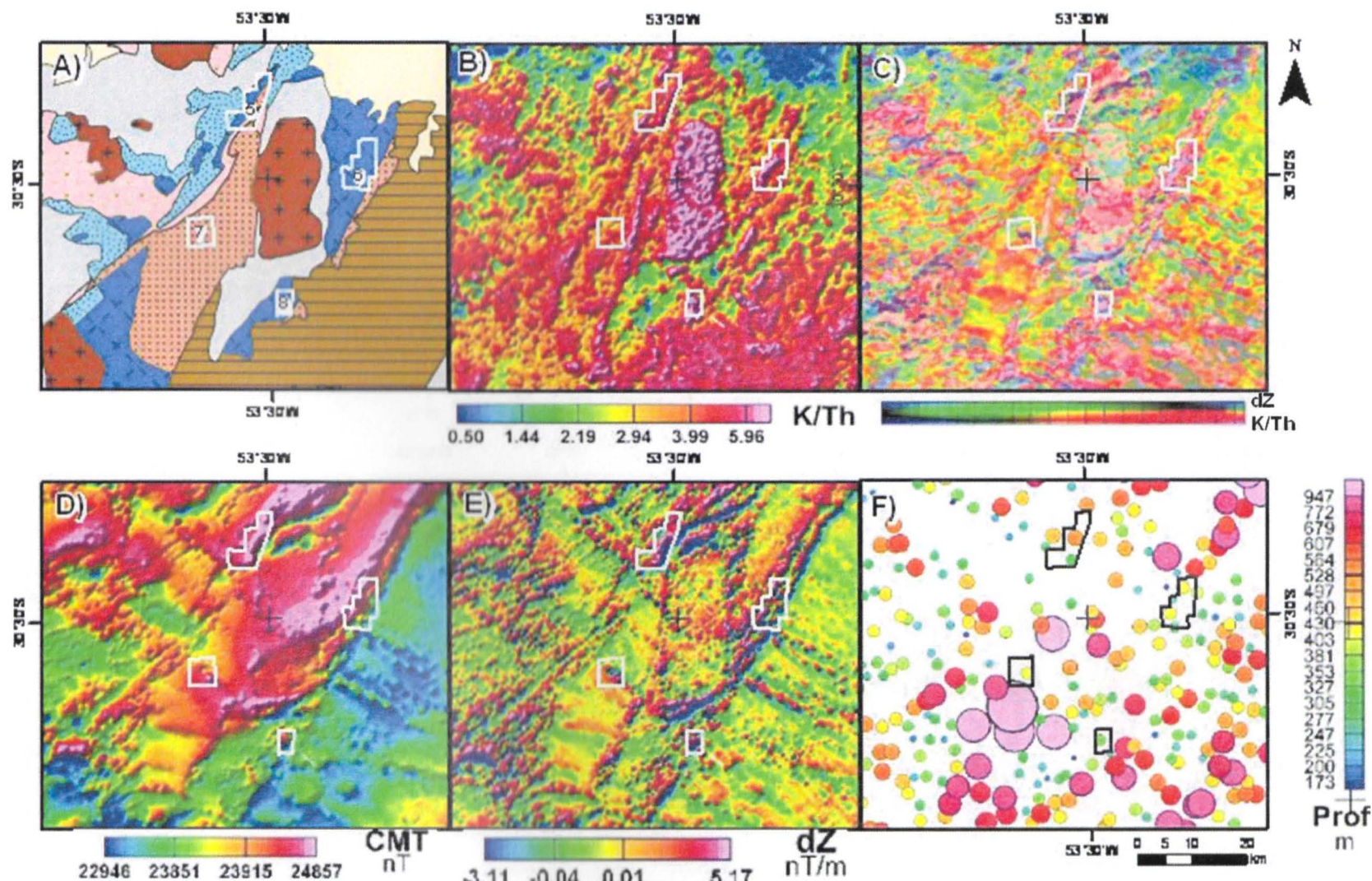


Figura 12 – Alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base delimitados na Sub-Bacia Camaquã Ocidental. A) Mapa geológico. B) Razão K/Th. C) Composição da razão K/Th e primeira derivada em Z. D) Campo Magnético Total. E) Primeira derivada em Z. F) Deconvolução de Euler.



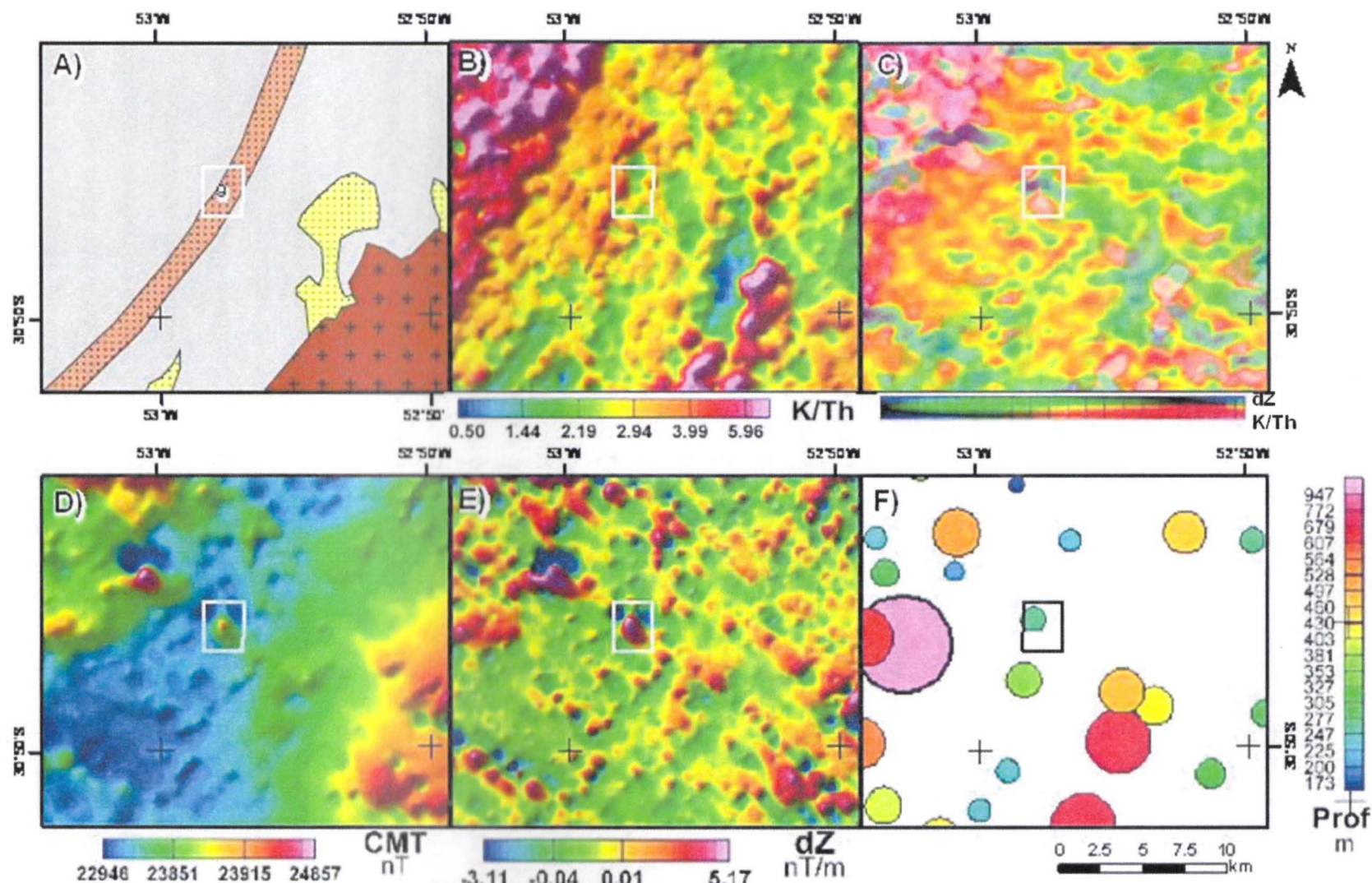


Figura 13 – Alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base delimitados na Sub-Bacia Camaquã Oriental. A) Mapa geológico. B) Razão K/Th. C) Composição da razão K/Th e primeira derivada em Z. D) Campo Magnético Total. E) Primeira derivada em Z. F) Deconvolução Euler.

## 8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foram processados neste trabalho os dados digitais aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria, levantados no ano de 1973 por projeto da CPRM, que cobrem parte da Bacia do Camaquã. O processamento foi realizado durante uma primeira etapa de trabalho e forneceu produtos de interpretação com qualidades suficientes para fundamentar a verificação de uma assinatura geofísica para a prospecção de metais base (Pb-Cu-Zn) na Bacia do Camaquã.

Considerou-se essencial para a etapa de interpretação dos dados aerogeofísicos o entendimento dos possíveis modelos metalogenéticos e os controles da mineralização propostos para a mineralização das Minas do Camaquã, bem como suas propriedades e seus contrastes físicos peculiares que pudessem ser realçados pelos dados aerogeofísicos de gamaespectrometria e magnetometria. Este trabalho ponderou o modelo diagenético numa fase inicial, com mesma idade da rocha hospedeira ( $590 \pm 6$  Ma a  $549 \pm 5$  Ma, idades de deposição dos Grupos Bom Jardim e Santa Bárbara, respectivamente).

Também foi considerado o modelo hidrotermal epigenético num momento posterior, gerado por um evento de caráter compressivo há aproximadamente 530 Ma o qual teve movimentação contínua por longo período, com idades pré e pós mineralização, o que é atestado pelo intenso fraturamento dos minerais de minério mais antigos dos veios. Este evento compressivo é relacionado à deformação da bacia e reativou falhas principais profundas de direção NNE gerando subsidiárias rasas, de direção geral NW a WNW por onde ocorreu a percolação de fluidos hidrotermais que promoveram a mineralização, principalmente na região das Minas do Camaquã.

Com base nestas observações foi possível obter uma assinatura aerogeofísica magnetométrica e gamaespectrométrica para as ocorrências de mineralizações de Cu-Pb-Zn das Minas Camaquã, a qual está possivelmente relacionada com zonas de hidrotermalismo associadas a falhas e fraturas rasas de direções em geral NW a WNW.

Depois de obtida a assinatura aerogeofísica para a mineralização de metais base das Minas do Camaquã, foi gerado um mapa com a composição dos dados da razão K/Th e os da primeira derivada na vertical. Desta forma foi possível delimitar nove alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base na Bacia do Camaquã.

Realizando uma análise minuciosa das principais características e intensidades das assinaturas aerogeofísicas em cada alvo exploratório delimitado, foi possível notar que nenhum dos alvos ocorre com as mesmas características das Minas do Camaquã (Alvo 1), embora muito próximas. No entanto, considera-se que os dados aerogeofísicos utilizados

neste trabalho possuem baixa resolução, e não permite realizar uma interpretação detalhada dos alvos, mas sim uma interpretação regional.

Deste modo, julga-se importante realizar levantamentos geofísicos (gamaespectrometria e magnetometria) de detalhe nos alvos exploratórios selecionados e posterior interpretação acerca dos controles de mineralizações e das assinaturas aerogeofísicas observados neste trabalho.

O quadro 05 resume as interpretações detalhadas das assinaturas aerogeofísicas (gamaespectrométrica e magnetométrica) para os nove alvos delimitados.

Quadro 05 – Principais características das anomalias geofísicas dos alvos exploratórios.

ALVO	Sub-bacia de ocorrência	Grupo de ocorrência	K/Th	dZ	Euler (prof.)	Observações
1	Camaquã Central	Santa Bárbara	Intensa	Intensa (WNW)	350 m	A razão K/Th é maior no relevo atual mais alto
2	Camaquã Central	Bom Jardim	Moderada	Fraca (WNW)	400 m	A razão K/Th é maior no relevo atual mais alto
3	Camaquã Central	Santa Bárbara	Moderada	Intensa (WNW)	250 m	A razão K/Th é maior no relevo atual mais baixo
4	Camaquã Central	Santa Bárbara	Moderada	Moderada (WNW)	350 m	A razão K/Th não apresenta relação com o relevo atual
5	Camaquã Ocidental	Bom Jardim e Santa Bárbara	Intensa	Intensa (NNE)	600 m	A razão K/Th não apresenta relação com o relevo atual
6	Camaquã Ocidental	Bom Jardim	Intensa	Intensa (NNE)	400 m	A razão K/Th não apresenta relação com o relevo atual
7	Camaquã Ocidental	Santa Bárbara	Moderada	Intensa (WNW)	430 m	A razão K/Th não apresenta relação com o relevo atual
8	Camaquã Ocidental	Bom Jardim	Intensa	Intensa (EW)	380 m	A razão K/Th não apresenta relação com o relevo atual
9	Camaquã Oriental	Santa Bárbara	Baixa	Intensa (WNW)	300 m	A razão K/Th é maior no relevo atual mais alto

Por fim, considera-se pertinente que, em uma etapa regional de prospecção de metais base em bacias sedimentares de mesmo contexto geológico e metalogenético das Minas do Camaquã, seja adotada a metodologia discutida neste trabalho.



## 9. CONCLUSÕES

As propriedades físicas peculiares dos controles das mineralizações de metais base (Cu-Pb-Zn) hospedadas em rochas sedimentares das Minas do Camaquã estão, possivelmente, relacionadas a um evento de percolação de fluidos hidrotermais por falhas e fraturas rasas com direção entre NW e WNW. Estas características foram realçadas, de maneira qualitativa, pelos mapas aerogeofísicos, indicando assim uma assinatura aerogeofísica (gamaespectrométrica e magnetométrica) para a mineralização em questão.

Desta forma, as anomalias representadas pelo mapa da razão K/Th indicaram forte relação com o evento de percolação de fluidos hidrotermais. Devido, durante no evento hidrotermal o elemento potássio ser bastante peculiar e, por outro lado, o elemento tório não estar necessariamente presente.

Os lineamentos com direção entre NW e WNW realçados pelo mapa da primeira derivada vertical indicaram forte relação com as falhas e fraturas que representam os controles estruturais das mineralização, principalmente por estas falhas ocorrerem com baixas profundidades e por serem preenchidas por minerais ferromagnéticos, como a magnetita que ocorre associada à mineralização de metais base (Cu-Pb-Zn) das Minas do Camaquã.

O mapa gerado, por meio da composição entre os dados aerogeofísicos da razão K/Th e os da primeira derivada na vertical do campo magnético total, pode destacar a relação entre as falhas profundas de direção NNE e falhas subsidiárias rasas de direção NW a WNW com um evento de percolação de fluidos hidrotermais, que possivelmente está relacionado com a mineralização de metais base na Bacia do Camaquã. Por meio de uma análise qualitativa deste mapa obteve-se a assinatura aerogeofísica da mineralização em questão.

Foi possível definir alvos exploratórios favoráveis à ocorrência de metais base (Cu-Pb-Zn) na Bacia do Camaquã. Estes alvos foram identificados com base na assinatura aerogeofísica obtida por este trabalho e que realçam as propriedades físicas dos controles das mineralizações das Minas do Camaquã. Os alvos exploratórios delimitados neste trabalho foram restritos aos Grupos Bom Jardim e Santa Bárbara, que hospedam o maior número de ocorrências já catalogadas de metais base dentre as unidades do Supergrupo Camaquã.

Finalizando, considera-se que este trabalho alcançou o objetivo proposto, qual seja o de obter uma assinatura aerogeofísica das mineralizações de metais base (Cu-Pb-Zn) que ocorrem no contexto das Minas do Camaquã, e a partir disso, foram identificados e delimitados nove alvos exploratórios na Bacia Sedimentar do Camaquã.

## 10. BIBLIOGRAFIA

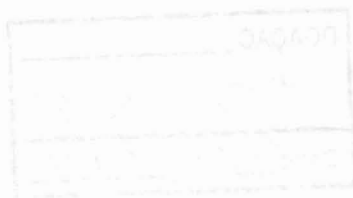
- Almeida F.F.M. 1966. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. *In: Semana de Debates Geológicos*, 2. Porto Alegre, 1966. Centro Acadêmico Estudos Geológicos UFRGS, p. 45-89.
- Almeida R.P. 2005. *Tectônica e Sedimentação do Ediacara ao Ordoviciano: Exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai Oriental)*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 203p.
- Almeida R.P., Janikian L., Fragoso-Cesar A.R.S., Fambrini G.L. 2010. The Ediacaran to Cambrian Rift System of Southeastern South America: Tectonic Implications. *The Journal of Geology*. **118**: 145-161.
- Badi W.R.S., Gonzalez A.P. 1988. Jazida de metais básicos de Santa Maria, Caçapava do Sul, RGS. *In: C. SHOBENHAUS et al., Principais depósitos Minerais do Brasil, Vol. III - Metais básicos não ferrosos e Al. DNPM.* p. 157-170.
- Beckel J. 1990. *Metalogenia del Cu, Pb y Zn en la Cuenca de Camaquã durante el Ciclo orogénico brasileiro – RS (Brasil)*. Universidad de Salamanca, Espanha. Tese de Doutorado. 275p.
- Bettencourt J.S. 1972. *A Mina de Cobre de Camaquã, Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 175p.
- Bettencourt J.S. 1976. Mineralogie, inclusions fluides et isotopes stables d'oxygène et soufre de la mine de cuivre de Camaquã - RS (un étude préliminaire). *In: XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Anais.* p. 409-423.
- Boyle R.W. 1972. Geochemical prospecting for thorium and uranium Deposits. *Developments in Economic Geology*, **16**: 71-78.
- Butterworth S. 1930. On the Theory of Filter Amplifiers. *Experimental wireless & wireless engineer*, **7**: 536-541.
- Carvalho P.F. 1932. Reconhecimento Geológico no Estado do Rio Grande do Sul, Boletim do Instituto Geológico e Mineralógico Brasileiro, Rio de Janeiro, **66**:1-72.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1995. Catálogo geral de produtos e serviços. Geologia. Levantamentos aerogeofísicos. Base de dados AERO. 2ª edição. Rio de Janeiro, 359p.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2004. Carta Geológica do Brasil ao milionésimo Sistema de Informações Geográficas – SIG. Rio de Janeiro. RJ. 41 CDs.



- Dickson B.L., Scott K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, Austrália, **17**(2): 187-200.
- Fambrini G.L. 2003. *O Grupo Santa Bárbara (Neoproterozoico III) da Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 264p.
- Fambrini G.L. 2007. Evolução Estratigráfica e Paleogeográfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-Bacia Camaquã Central, RS. *Revista do Instituto de Geociências - USP*. São Paulo. **7**(2): 1-24.
- Fragoso-Cesar A.R.S. 1980. O Cráton Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio-Su I- Riograndense. In: SBG, XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú, *Anais*, v.1. p. 2879-2892.
- Fragoso-Cesar A.R.S. 1984. *Evolução paleoambiental e tectônica da Bacia do Camaquã: uma introdução*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 105p.
- Fragoso-Cesar A. R.S., Facini O., Paim P. S. G., Lavina E.L., Altamirano I. 1985. Revisão na Estratigrafia das Molassas do Ciclo Brasileiro no Rio Grande do Sul. In: II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 1985, Florianópolis – SC. *Anais*. v. 1. p. 477-491.
- Fragoso-Cesar A.R.S. 1991. Tectônica de Placas no Ciclo Brasileiro: as orogenias dos Cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, IG-USP, São Paulo, SP, 366p.
- Fragoso-Cesar A.R.S., Fambrini G.L., Almeida R.P., Pelosi A.P.M.R., Janikian L., Riccomini C., Machado R., Nogueira A.C.R., Saes G.S. 2000. The Camaquã extensional basin: Neoproterozoic to early Cambrian sequences in southernmost Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(3):438-441.
- Fragoso-Cesar A.R.S., Almeida R.P., Fambrini G.L., Pelosi A.P.M.R., Janikian L. 2003. A Bacia Camaquã: um sistema intracontinental anorogênico de rifts do Neoproterozóico III-Eopaleozóico no Rio Grande do Sul. In: SBG, I Encontro sobre a Estratigrafia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, *Anais*.
- Grant J. A. 1998. Ten things the text book don't tell about processing and archiving airborne gamma ray spectrometric data. In. *Current Research*. 1998. D. Geological Survey of Canada, Ottawa, 83-87.
- IAEA, 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. IAEA-TECDOC-1363. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Janikian F. 2004. *Seqüências deposicionais e evolução paleoambiental do Grupo Bom Jardim e da Formação Acampamento Velho, Supergrupo Camaquã, Rio Grande do*

- Sul. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 189p.
- Laux J. H., Lindenmayer Z. G. 2000. As Minas do Camaquã: um século de evolução de hipóteses genéticas. In L. H. Ronchi & A. O. C. Lobato (ed.) As Minas do Camaquã. São Leopoldo, Editora UNISINOS, p. 133-164.
- Minty B.R.S. 1991. Sample Micro-Levelling for Aeromagnetic Data. *Exploration Geophysics*. **22**: 591-592.
- Newhouse W.H. 1942, Ore Deposit as Related to Structural Fratures – Ed. W.H. Newhouse, Princeton, New Jersey, 24p.
- Oliveira J.M.M.T., Fernandes L.A.D. 1991. Estágios finais da evolução do Cinturão Dom Feliciano: Tectônica e sedimentação da Formação Arroio dos Nobres. In: SBG, III Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Rio Claro, Boletim de Resumos Extensos, p. 58-59.
- Oliveira N.V., Endo I., Oliveira L.G.S. 2005. Geometria do Sinclinal Gandarela baseada na deconvolução de Euler 2D e 3D – Quadrilátero Ferrífero (MG). *Revista Brasileira de Geofísica*. São Paulo. **23**(3): 221-232
- Remus M.V.D., Hartmann L.A., MacNaughton N.J., Groves D.I., Fletcher I.R. 2000. The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brazilian Cycle in southern Brazil. *Journal of South American Sciences*. **13**: 191-216.
- Reeves C. 2005. *Aeromagnetic Surveys, Principles, Practice & Interpretation*. Earthworks Geosoft. Australia. 155p.
- Ribeiro M., Bocchi P.R., Figueiredo F.P.M., Tessari R.I. 1966. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul – RS. Div. Fom. Prod. Min. – Bol. nº 127, 232p – Rio de Janeiro.
- Ribeiro M., Carraro C.C. 1971. Geotectonic Map of the Caçapava do Sul Region RS – Brazil. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. (Mapa).
- Paim P.S.G. 2002. Minas do Camaquã – RS Marco da Mineração de Cobre no Brasil. SIGEP 64. p. 501-510.
- Santos M. G. M. 2010. *Tectônica e Sedimentação na Bacia do Camaquã Central (RS): Exemplos do Grupo Guaritas e do Grupo Santa Bárbara*. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 176p.
- Shives R.B.K, Charbonneau B.W., Ford K.L. 2001. The Detection of Potassic Alteration by gamma ray Spectrometry – Recognition of alteration related to mineralization. *Society of Exploration Geophysics*. Canada. **65**(6) 2001-2011.
- Soares M.S. 2001. *Processamento e Interpretação de dados Aerogeofísicos Magnetométrico e Gamaespectrométricos no Estudo do Controle das Mineralizações*

- Auríferas na Região do Complexo Bossoroca, São Sepé, RS.* Dissertação de Mestrado, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, RS, 161p.
- Teixeira G., Gonzalez M. 1988. Minas do Camaquã, Município de Caçapava do Sul, RS. *In*: C. SHOBENHAUS etd., Principais depósitos Minerais do Brasil, Vol. III - Metais básicos não ferrosos e Al. DNPM. p. 34-40.
- Thompson D.T. 1982. EULDPH. A New technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*. **47**: 31-37.
- Tomba C.L.B. 2006. *Tectônica e Sedimentação das Coberturas Triássicas Isoladas sobre o Alto Estrutural do Rio Grande na região entre Santana da Boa Vista e Canguçu, RS.* Monografia de Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 59p.
- Vasconcelos P.M., Onoe A. T., Kawashita K, Soares A.J., Teixeira W. 2002.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ -geochronology at the Instituto de Geociências, USP: Instrumentation, analytical procedures, and calibration. *An. Bras. Cienc.* **74**: 297-342.
- Whitehead N & Musselman C. 2007. *Montaj MAGMAP Filtering, 2D Frequency Domain Processing of Potencial Field Data – Extation for Oasis Montaj 6.4. – TUTORIAL.* Toronto, Canada. 76p.



DOAÇÃO \_\_\_\_\_

TGC-05P

Data: 01/02/11