



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Daniel Chaves dos Santos

**Gamaespectrometria aplicada à prospecção de fosfatos lateríticos na Região
do Gurupi – NE do Pará e NW do Maranhão**

Rio de Janeiro

2019

Daniel Chaves dos Santos

**Gamaespectrometria aplicada à prospecção de fosfatos lateríticos na região do Gurupi –
NE do Pará e NW do Maranhão**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Ângelo Mane

Coorientadora: Prof.^a Dra. Nely Palermo

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

S237 Santos, Daniel Chaves dos.
Gamaespectrometria aplicada à prospecção de fosfatos lateríticos na região do Gurupi – NE do Pará e NW do Maranhão / Daniel Chaves dos Santos. – 2019.
86 f.: il.

Orientador: Miguel Ângelo Mane.
Coorientadora: Nely Palermo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Fosfatos – Minas e mineração – Pará – Teses. 2. Fosfatos – Minas e mineração – Maranhão – Teses. 3. Prospecção radioativa – Pará – Teses. 4. Prospecção radioativa – Maranhão – Teses. 5. Laterita – Pará – Teses. 6. Laterita – Maranhão – Teses. 7. Prospecção – Métodos geofísicos – Teses. 8. Espectrometria de raio gama – Teses. I. Mane, Miguel Ângelo. II. Palermo, Nely. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 553.64:550.835(811.5+812.1)

Bibliotecária responsável: Taciane Ferreira da Silva / CRB-7: 6337

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Daniel Chaves dos Santos

**Gamaespectrometria aplicada à prospecção de fosfatos lateríticos na Região do Gurupi
– NE do Pará e NW do Maranhão**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Aprovada em 04 de Julho de 2019.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Miguel Ângelo Mane (Orientador)

Faculdade de Geologia – UERJ

Prof.^a Dra. Nely Palermo (Coorientadora)

Faculdade de Geologia – UERJ

Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino

Centro de Tecnologia Mineral – UERJ

Prof. Dr. Cosme Ferreira da Ponte Neto

Observatório Nacional – MCTIC

Rio de Janeiro

2019

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado, não poderia ser possível sem o apoio de algumas pessoas que me acompanharam e foram fundamentais para a realização de mais um objetivo.

Primeiro, agradeço a minha família, pais, irmãos, tios, primos, sobrinhos, amigos, que durante o tempo desta dissertação foram fundamentais para me trazer de volta à realidade, demonstrar que sou amado e de que posso mais do que imagino, sem vocês nada disso seria possível.

Desejo agradecer também aos meus colegas de Mestrado, especialmente a Mariana Carvalho e Davy Raeder, cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos. E também a todos os outros colegas de mestrado e graduação, os quais tive a oportunidade de trocar alguma experiência.

Agradeço aos funcionários e ao corpo docente da Faculdade de Geologia da UERJ, que foram sempre solícitos.

Por último, quero agradecer ao meu orientador e co-orientadora, Miguel Mane e Nely Palermo, por acreditarem no meu projeto, pela disponibilidade de tempo e principalmente pela troca de idéias e experiências.

Se avexe não. Amanhã pode acontecer tudo, inclusive nada.

Flávio José – A Natureza das Coisas

RESUMO

SANTOS, Daniel Chaves dos. **Gamaespectrometria aplicada à prospecção de fosfatos lateríticos na Região do Gurupi – NE do Pará e NW do Maranhão**. 2019. 86f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Com o aumento populacional e assim a necessidade crescente por alimentos, a busca e produção de insumos fosfatados tem aumentado muito nos últimos anos. Com isso, acelerou a procura por novas ocorrências de fósforo ou mesmo viabilização de projetos de pesquisa sobre as já existentes, visto que o fósforo é um elemento essencial na produção de fertilizantes. As ocorrências de fosfatos aluminosos na região NE do Pará e NW do Maranhão são conhecidas desde o início século XX, quando eram consideradas como depósitos de guano. Desde então vários autores apresentaram resultados sobre a mineralogia, geoquímica e gênese dessas ocorrências, definindo-as como mineralização metassedimentar lateritizada. A análise dos dados gamaespectrométricos terrestres e aéreos, tem como objetivo analisar como os radioelementos se comportam sobre os corpos mineralizados em fosfatos aluminosos, sendo que na maioria das vezes, minerais fosfáticos apresentam traços de urânio em sua estrutura. O levantamento terrestre foi realizado nos Depósitos Sapucaia e Serrote, com o aparelho RS-230BGO, a aerogeofísica utilizada corresponde ao levantamento aerogeofísico do Gurupi, com espaçamento de 500 metros entre as linhas de voo e 10000 metros entre as linhas de controle, com altura de voo fixada em 100 metros. O processamento dos dados terrestres mostrou boa correspondência dos depósitos Sapucaia e Serrote com o levantamento, sendo o corpo mineralizado delimitado pelo método gamaespectrométrico terrestre. As ocorrências de laterita fosfática conhecidas em todo NE do Pará e NW do maranhão compreendidas no levantamento aerogeofísico supracitado, com dimensões compatíveis ao espaçamento do levantamento, apresentam contornos bem definidos nos canais eU, eTh, contagem total e imagem do ternário. As lateritas ferruginosas, de expressiva ocorrência na região, tem assinatura geofísica praticamente coincidente com as lateritas fosfáticas, apresentando diferenças apenas nos valores absolutos de eU e contagem total, além de apresentarem o mesmo contexto geomorfológico. O detalhe do aerolevanteamento sobre as ocorrências de laterita fosfática conhecidas pode contribuir futuramente com correlações acerca da mineralogia dos horizontes superficiais dos lateritos fosfáticos. O levantamento gamaespectrométrico, seja terrestre ou aéreo, assim como já demonstrado para outras ocorrências de fosfato no Brasil, delimita os corpos de laterita enriquecidos em fosfatos de alumínio, sendo um método indireto que pode contribuir positivamente para a exploração de lateritas fosfáticas no NE do Pará e NW do Maranhão.

Palavras-chave: Gamaespectrometria. Aerogamaespectrometria. Fosfatos aluminosos. Laterita fosfática. Gurupi.

ABSTRACT

SANTOS, Daniel Chaves dos. **Gamma-ray spectrometry applied to the prospection of lateritic phosphates in the Gurupi Region - NE of Pará and NW of Maranhão.** 2019. 86f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

The growing demand for food due to increasing population growth and the poor quality of Brazil soil has accelerated the search for new occurrences of phosphorus. Also, the feasibility of research projects on existing areas since phosphorus is an essential element in the production of fertilizers. The occurrences of aluminous phosphates in the NE region of Pará and NW of Maranhão have been known since the beginning of the 20th century when they were considered as guano deposits. Since then several authors have presented results on the mineralogy, geochemistry, and genesis of these occurrences, defining them as lateritized metasedimentary mineralization. Ground and airborne gamma-ray data analysis aim to evaluate how radioelements behave on the mineralized bodies in aluminous phosphates, and in most cases, phosphate minerals have traces of uranium in their structure. The ground survey was carried out in the Sapucaia and Serrote depots, with the RS-230BGO device, the airborne geophysical used corresponds to the Gurupi airborne geophysical survey, with a spacing of 500 meters between the flight lines and 10,000 meters between the control lines, with height flight set at 100 meters. The ground data processing showed a positive correlation with the airborne surveys in the Sapucaia and Serrote deposits, being the mineralized body delimited by the ground gamma spectrometric method. The occurrence of phosphate laterite known throughout NE of Pará and NW of Maranhão included in the airborne geophysical survey have well-defined contours in the eU, eTh, total and ternary image channels. The ferruginous laterites, with significant occurrence in the region, have a geophysical signature that is almost coincident with the phosphate laterites, presenting differences only in the absolute values of eU and total count, besides presenting the same geomorphological context. The delimitation of the known phosphate laterite occurrences through the detailed airborne survey can contribute with correlations about the mineralogy of the superficial horizons of the phosphate laterites. Gamma-ray spectrometry (ground or airborne) demonstrated for other phosphate occurrences in Brazil, discriminates the laterite bodies enriched in aluminum phosphates, being an indirect method that can contribute to the exploration of phosphate laterites in the NE of Pará and NW of Maranhão.

Keywords: Airborne gamma-ray spectrometry. Gamma-ray spectrometry. Aluminous phosphates. Laterite phosphate. Gurupi.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização do levantamento aerogeofísico do Gurupi.....	17
Figura 2 –	Área do levantamento aerogeofísico do Gurupi em relação.....	18
Figura 3 –	Mapa geológico regional, destacando a área do levantamento aerogeofísico do Gurupi e unidades geológicas descritas.....	20
Figura 4 –	Vista aérea do depósito de Sapucaia.....	29
Figura 5 –	Vista do depósito Serrote, visada para oeste, exagero vertical 3x (Google Earth).....	29
Figura 6 –	Furo representativo da sucessão de horizontes no Depósito Sapucaia.....	32
Figura 7 –	Detalhe do furo que representa a sucessão de horizontes no Depósito Sapucaia.....	33
Figura 8 –	Seção geológica gerada através dos furos de sonda realizados no alvo Sapucaia.....	34
Figura 9 –	Espectômetro, modelo RS-230BGO.....	36
Figura 10 –	Demonstração da metodologia utilizada no levantamento, com o aparelho encostado no chão.....	37
Figura 11 –	Mapa de pontos do levantamento gamaespectrométrico terrestre no Depósito Sapucaia.....	38
Figura 12 –	Mapa de pontos do levantamento gamaespectrométrico terrestre no Depósito Serrote.....	39
Figura 13 –	Demonstração da metodologia utilizada no levantamento, com o aparelho a 1,0m do chão.....	40
Figura 14 –	Modelo de tabela utilizado para organizar os dados da gamaespectrometria terrestre nos depósitos de Sapucaia e Serrote.....	41
Figura 15 –	Metodologia para determinação dos valores máximo e mínimo dos radioelementos.....	42
Figura 16 –	Localização dos alvos de laterita fosfática em relação ao aerolevantamento.....	44
Figura 17 –	Localização dos alvos de laterita ferruginosa em relação ao Depósito Sapucaia.....	44
Figura 18 –	Metodologia utilizada para o recorte dos pontos do levantamento sobre	

	os alvos.....	45
Figura 19 –	Metodologia para determinação dos valores máximo e mínimo dos radioelementos.....	46
Figura 20 –	Metodologia para delimitação do corpo mineralizado, nos depósitos Sapucaia e Serrote.....	47
Figura 21 –	Grid do canal eU (ppm) – Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	48
Figura 22 –	Grid do canal contagem total (ppm) – Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	49
Figura 23 –	Grid do canal eTh (ppm) – Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	50
Figura 24 –	Grid do canal K (ppm) – Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	51
Figura 25 –	Grid do U/Th – Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	52
Figura 26 –	Grid do canal U/K – Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	53
Figura 27 –	Grid do canal Th/K – Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	54
Figura 28 –	Grid da imagem ternário – Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	55
Figura 29 –	Grid do canal eU (ppm) – Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	56
Figura 30 –	Grid do canal contagem total (ppm) – Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	57
Figura 31 –	Grid do canal eTh (ppm) – Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	58
Figura 32 –	Grid do canal K (%) – Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	59
Figura 33 –	Grid do canal U/Th – Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	60
Figura 34 –	Grid do canal U/K – Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	61

Figura 35 – Grid do canal Th/K – Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	62
Figura 36 – Grid da imagem ternário – Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre.....	63
Figura 37 – Grids dos radioelementos para o Alvo Sapucaia.....	65
Figura 38 – Grids dos radioelementos para o Alvo Itacupim.....	66
Figura 39 – Grids dos radioelementos para o Alvo Serra do Pirocaua.....	67
Figura 40 – Grids dos radioelementos para o Alvo Boa Vista.....	68
Figura 41 – Grids dos radioelementos para o Alvo Caeté.....	69
Figura 42 – Grids dos radioelementos para o Alvo Cansa Perna.....	70
Figura 43 – Grids dos radioelementos para o Alvo Jandiá.....	71
Figura 44 – Grids dos radioelementos para o Alvo Tracuí.....	72
Figura 45 – Grids dos radioelementos para o Alvo Trauíra.....	73
Figura 46 – Grids do canal contagem total (ppm) para todos os alvos relativos a pesquisa: Serra do Pirocaua, Sapucaia, Trauíra, Cansa Perna, Itacupim, Caeté, Tracuí, Jandiá e Boa Vista.....	74
Figura 47 – Grids do canal contagem total (ppm) para todos os alvos relativos a pesquisa: Serra do Pirocaua, Sapucaia, Trauíra, Cansa Perna, Itacupim, Caeté, Tracuí, Jandiá e Boa Vista.....	75
Figura 48 – Grids dos rádio elementos para o Alvo Portuga.....	76
Figura 49 – Grids dos rádio elementos para o Alvo Pau Amarelo.....	77
Figura 50 – Grids do canal contagem total e imagem do ternário para os alvos de Laterita Fosfática.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatística dos valores dos radioelementos para o Depósito Sapucaia.....	64
Tabela 2 – Estatística dos valores dos radioelementos para o Depósito Serrote.....	64
Tabela 3 – Estatística dos valores dos radioelementos para o Depósito Sapucaia.....	79
Tabela 4 – Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Trauíra.....	79
Tabela 5 – Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Serra do Pirocaua..	79
Tabela 6 – Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Itacupim.....	79
Tabela 7 – Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Pau Amarelo.....	79
Tabela 8 – Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Portuga.....	80

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	13
1	GAMASPECTROMETRIA APLICADA A PROSPECÇÃO DE FOSFATOS LATERÍTICOS NA REGIÃO DO GURUPI – NE DO PARÁ E NW DO MARANHÃO.....	15
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivo	15
1.3	Localização da área de estudo.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Geologia Regional.....	18
2.1.1	<u>Fragmento Cratônico São Luís.....</u>	21
2.1.2	<u>Cinturão Gurupi.....</u>	21
2.1.3	<u>Coberturas Sedimentares Fanerozóicas.....</u>	23
2.1.4	<u>Coberturas cenozóicas.....</u>	23
2.2	Evolução Geotectônica.....	24
2.3	Geofísica Terrestre aplicada a fosfato –Gamaspectrometria.....	25
2.4	Aerogeofísica aplicada a fosfato - Gamaspectrometria.....	26
3	GEOLOGIA LOCAL.....	28
3.1	Contexto geomorfológico.....	28
3.2	Contexto geológico local	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1	Gamaspectrometria Terrestre.....	36
4.1.1	<u>Introdução.....</u>	36
4.1.2	<u>Levantamento Terrestre no Depósito Sapucaia.....</u>	37
4.1.3	<u>Levantamento Terrestre no Depósito Serrote.....</u>	38
4.1.4	<u>Processamento dos dados e <i>grids</i>.....</u>	40
4.1.5	<u>Análise estatística de valores dos radioelementos sobre o contorno do corpo mineralizado.....</u>	42
4.2	Aerogamaspectrometria.....	43
4.2.1	<u>Introdução.....</u>	43
4.2.2	<u>Processamento dos dados aerogeofísicos sobre os pontos de interesse.....</u>	43

4.2.3	<u>Análise estatística de valores dos radioelementos sobre o contorno do corpo mineralizado.....</u>	45
5	RESULTADOS.....	47
5.1	Gamaespectrometria terrestre.....	47
5.1.1	<u>Grids gerados para os Depósitos de Sapucaia e Serrote.....</u>	47
5.1.2	<u>Análise estatística dos Depósitos de Sapucaia e Serrote.....</u>	64
5.2	Aerogamaespectrometria.....	64
5.2.1	<u>Análise do levantamento sobre os alvos de pesquisa – Laterita Fosfática.....</u>	64
5.2.2	<u>Análise do levantamento sobre os alvos de pesquisa – Laterita Ferruginosa.....</u>	76
5.2.3	<u>Análise estatística dos alvos de laterita fosfática e ferruginosa.....</u>	79
	CONCLUSÕES E DISCUSSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS	83

INTRODUÇÃO

As ocorrências de fosfatos de alumínio lateríticos, que ocorrem predominantemente nas regiões costeiras do estado do Pará (NE) e Maranhão (NW), são alvos de estudo desde o início do século XX, quando as primeiras descrições de fosfatos foram mencionadas na região NW do maranhão, sendo consideradas como depósitos de guano (*Shaw et al*, 1925). Na década de 70 novas ocorrências foram descobertas através do “Projeto Fosfatos do Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão”, desenvolvido pelo Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas (NCGG) da Universidade Federal do Pará. Desde então, vários autores (COSTA, 1980, 1991, TOLEDO *et al*, 2006) apresentaram resultados sobre a mineralogia, geoquímica e gênese dessas ocorrências, definindo-as como mineralização metassedimentar lateritizada. A mineralogia dessas ocorrências é representada principalmente pelos minerais da série crandalita-goyazita (COSTA *et al*, 1980), estes fosfatos contêm U e Th como elementos traços em sua estrutura.

O estudo mais detalhado, dentre todas as ocorrências de laterita fosfática, ocorreu na ocorrência conhecida como Sapucaia. A primeira empresa a detalhar a ocorrência foi a Fosfatar Mineração, que em 2011 foi adquirida pela *junior companie* canadense Rio Verde Minerals. A partir de 2013 o projeto passou para a empresa B&A Mineração, uma *joint Venture* entre a AGN Mineração e o Banco BTG Pactual. Após uma mudança na estrutura e de estratégia do grupo, a empresa em 2017 passou a se chamar Phosfaz Fertilizantes.

Os trabalhos realizados pelas empresas citadas envolveram mapeamento geológico, levantamentos radiométricos terrestres, abertura de trincheiras, sondagem rotativa, levantamento topográfico, cálculo de reserva, testes de beneficiamento em laboratório e em planta piloto e estudos de viabilidade econômica.

Através do estudo detalhado do Depósito Sapucaia, no qual o presente autor teve a oportunidade de participar do levantamento terrestre gamaespectométrico de detalhe, como geólogo da empresa Rio Verde Minerals, notou-se que as lateritas fosfáticas são coincidentes com anomalias radiométricas no canal do urânio, e ocorrem entre uma cota que varia de 50 a 90 metros. A partir desta premissa, trabalhos de cunho regional foram realizados pelas empresas citadas anteriormente, através das imagens do levantamento aerogeofísico do Gurupi, em que valores anômalos de eU foram visitados, visando a descoberta de novas ocorrências de laterita fosfática na região do Gurupi. Essa comparação também foi feita para outros alvos

conhecidos na região, como por exemplo: Trauíra, Serra do Pirocaua, Caeté, Tracua, Itacupim, Cansa Perna e Boa Vista.

O levantamento aerogeofísico utilizado como base para o estudo regional foi o **PROJETO AEROGEOFÍSICO GURUPI**, executado entre 22/10/2008 e 04/11/2009, o qual faz parte do **PROGRAMA GEOLOGIA DO BRASIL**, vinculado ao Ministério de Minas e Energia e à Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, tendo sido executado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, através da sua divisão de Geofísica – DIGEOF.

O desenvolvimento deste produto abrangeu uma área de 35.881 km² nos Estados do Pará e do Maranhão. Os trabalhos nesta área foram desenvolvidos através do recobrimento de 76.754,18 km de perfis de alta resolução e foram realizados com os métodos magnetométrico e gamaespectrométrico, com linhas de voo e controle espaçadas de 500m e 10.000m, respectivamente, orientadas nas direções N-S e E-W.

O levantamento regional executado pelas empresas citadas utilizou apenas as imagens disponibilizadas, ou seja, as empresas não disponibilizavam do banco de dados “Bruto” (.gdb). As imagens limitam a delimitação das anomalias em alta resolução, o que dificulta a identificação das lateritas fosfáticas em campo. Através do banco de dados em extensão .gdb, que seriam os dados brutos do levantamento em forma de tabela, que pode ser trabalhada em ambiente do software Oasis Montaj (Geosoft), é possível melhorar a resolução em pixel do levantamento nos pontos de interesse.

Outro ponto de dificuldade é que as lateritas ferruginosas, de grande ocorrência na área de pesquisa, também são coincidentes com anomalias radiométricas, e também ocorrem em cotas entre 30 e 90m.

1 GAMAESPECTROMETRIA APLICADA À PROSPECÇÃO DE FOSFATOS LATERÍTICOS NA REGIÃO DO GURUPI – NE DO PARÁ E NW DO MARANHÃO

1.1 Justificativa

Com o aumento populacional e assim a necessidade crescente por alimentos, a busca e produção de insumos fosfatados tem aumentado muito nos últimos anos. O Brasil, por estar situado numa faixa intertropical úmida apresenta solos ácidos e mineralmente pobres em nutrientes. Esta característica geomorfológica condiciona o país à necessidade do emprego maciço de fertilizantes para reposição dos nutrientes.

Não existem trabalhos acadêmicos ou de qualquer outra espécie publicados sobre este assunto, gamaespectrometria com foco nas laterittas fosfáticas, portanto essa dissertação tem papel de fundamental importância no incentivo à buscas de novos prospectos na região NE do Pará e NW do Maranhão. Essas regiões, assim como toda região norte do Brasil, são carentes de insumos fosfáticos, pois estes se concentram mais na região sudeste e centro-oeste do Brasil.

1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de uma assinatura geofísica para as ocorrências de laterita fosfática, através de processamento do levantamento aerogeofísico do Gurupi, com foco nos dados gamaespectrométricos, e do levantamento gamaespectrométrico terrestre, executado nos depósitos de Sapucaia e Serrote. Foram gerados *grids* de detalhe nos canais do eU, eTh, K, contagem total, ternário e razões, sobre os alvos já conhecidos, visando estabelecer como as ocorrências de laterita fosfática se comportam em relação ao levantamento.

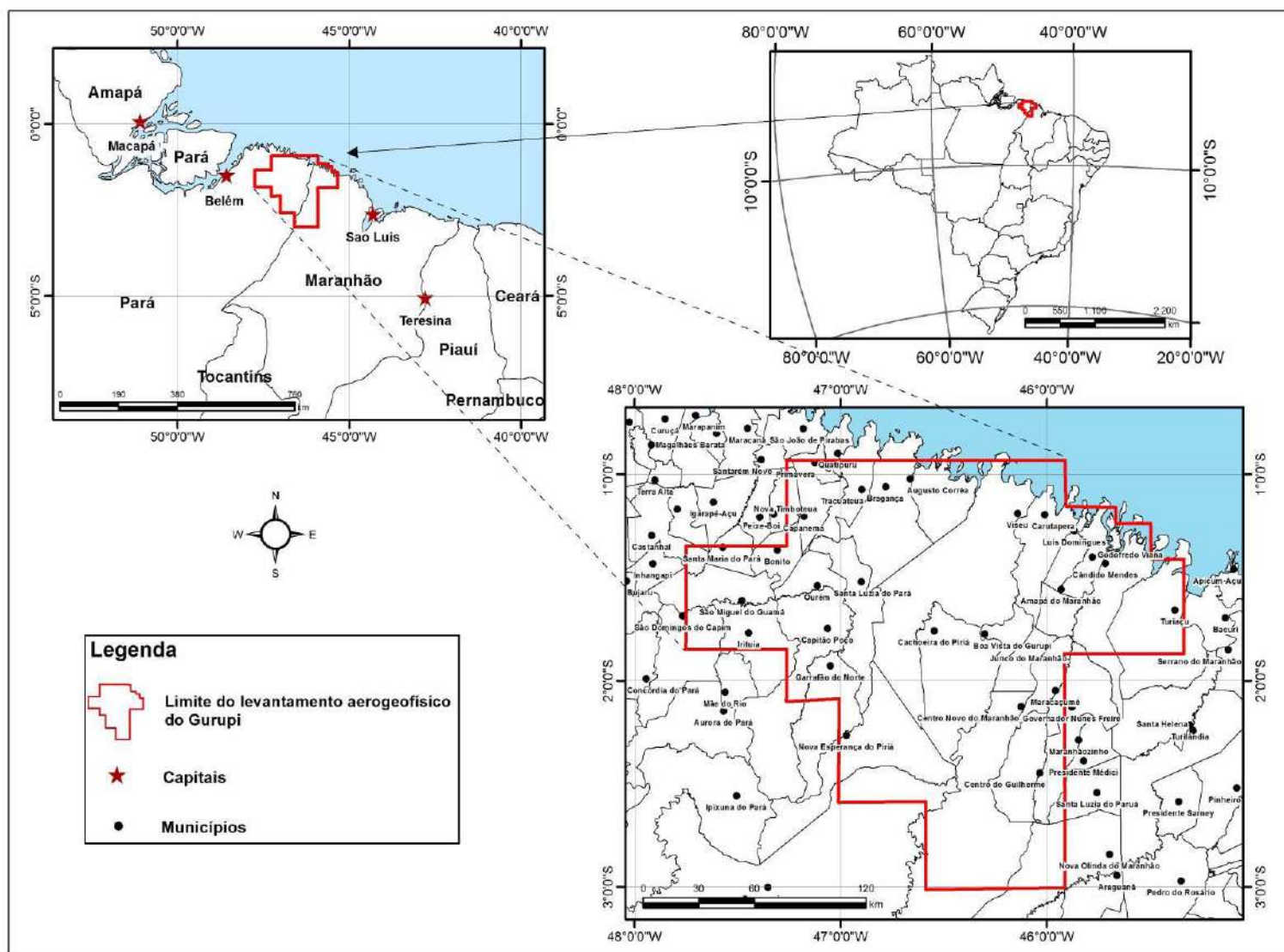
A metodologia empregada poderá ser aplicada na busca de novas ocorrências e criar novos prospectos de laterita fosfática na região do Gurupi, sendo que a comparação dos *grids* gerados com as ocorrências conhecidas possibilitem desenvolver uma assinatura geofísica, e

posteriormente investigar pontos desconhecidos em todo o levantamento que possuam a mesma assinatura.

1.3 Localização da área de estudo

A área do levantamento aerogeofísico abrange a porção nordeste do Estado do Pará e a parte noroeste do Estado do Maranhão, Brasil. A área total de cobertura do levantamento é de 35881 km², os alvos utilizados na pesquisa se concentram na porção N/NNE do levantamento. A Figura 1 apresenta a área em relação ao Brasil, bem como o detalhe da mesma.

Figura 1 - Localização do levantamento aerogeofísico do Gurupi



Fonte: O autor, 2019.

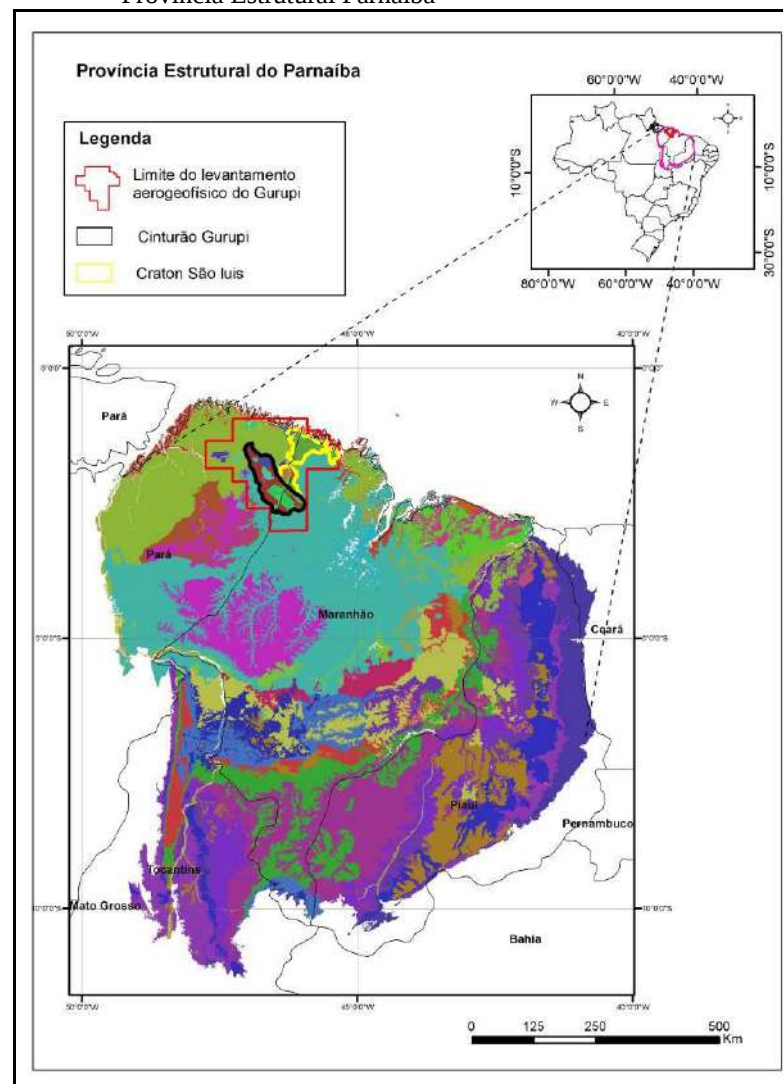
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geologia Regional

A área compreendida pelo levantamento aerogeofísico do Gurupi está localizada na região NE do Pará e NW do Maranhão (Figura 02), inserida na porção NW da província estrutural do Parnaíba (HASUI;ABREU;VILAS, 1984).

Nessa região se distinguem quatro domínios tectônicos maiores: (1) Fragmento Cratônico São Luís, (2) Cinturão Gurupi , (3) Bacias Sedimentares Fanerozóicas e (4) Coberturas Superficiais Cenozóicas, todos representados na área do levantamento (VASQUEZ *et al.*, 2008; VASQUEZ; KLEIN; LOPES, 2012).

Figura 2 – Área do levantamento aerogeofísico do Gurupi em relação à Província Estrutural Parnaíba

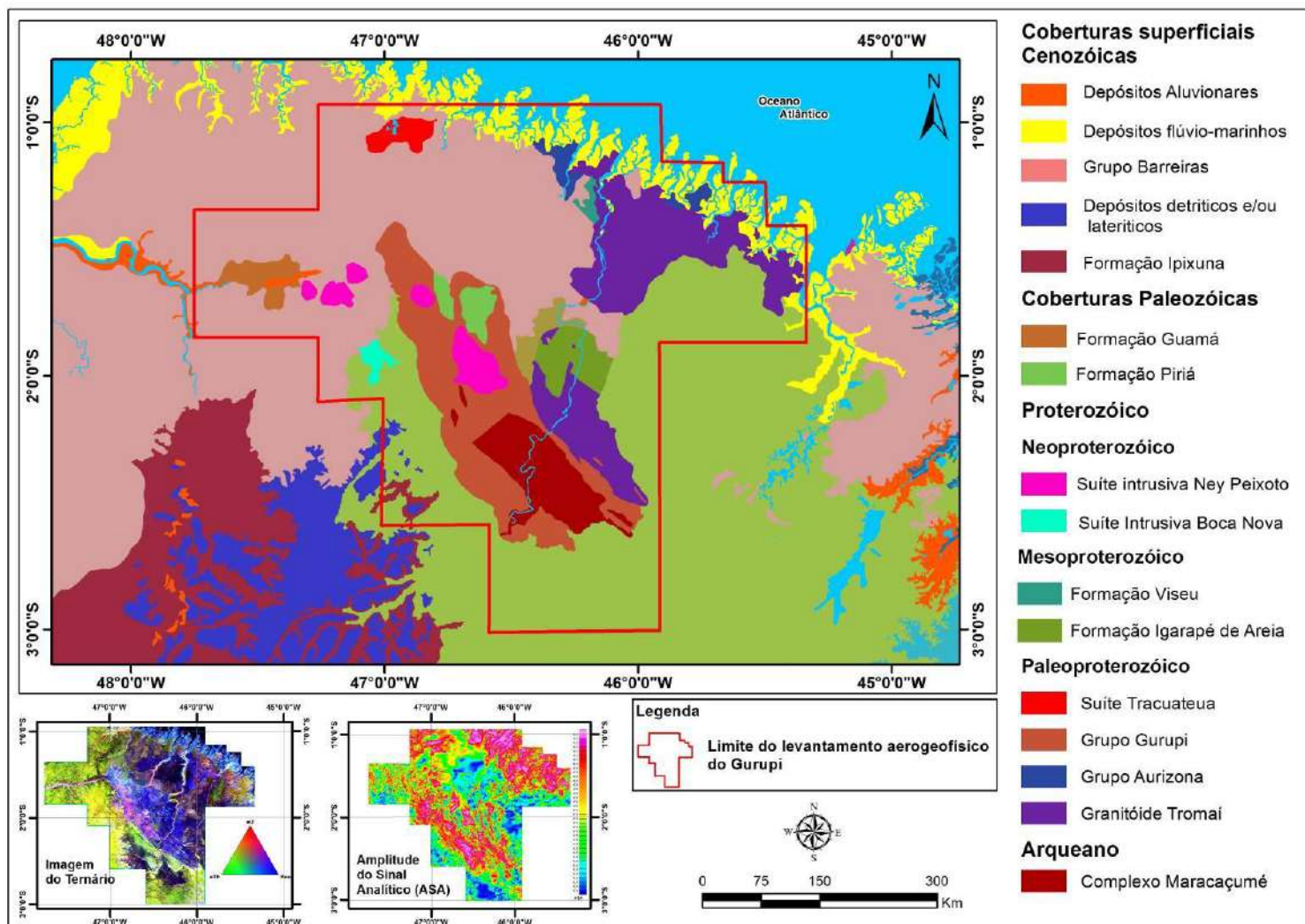


Fonte: CPRM, 2003.

O Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi, unidade geotectônica que o limita para sul-sudoeste, foram definidos por Almeida et al. (1976) a partir dos estudos geocronológicos baseados nos métodos Rb-Sr (idade convencional) e K-Ar em minerais (Hurley et al., 1967; 1968; Almeida et al., 1968; Cordani et al., 1968; Almaraz & Cordani, 1969) que mostraram a existência de dois domínios distintos na região. As rochas que afloram em direção à costa atlântica apresentam uma assinatura paleoproterozóica, com idades em torno de 2000 Ma, enquanto que as rochas aflorantes para sul-sudoeste, nas porções mais interiores do continente, possuem uma assinatura neoproterozóica, com idades principalmente no intervalo 800-500 Ma, segundo os sistemas isotópicos Rb-Sr e K-Ar. Esses domínios foram denominados, respectivamente, Cráton São Luís e Cinturão Gurupi. Devido às evidências geológicas e geocronológicas de que o Cráton São Luís seja uma pequena parte do Cráton Oeste Africano que ficou no continente Sul americano, mais recentemente tem sido utilizada a denominação de Fragmento Cratônico São Luís (KLEIN et al., VASQUEZ et al., 2008).

O limite entre o Fragmento Cratônico São Luís e o Cinturão Gurupi (Figura 3) é marcado pela Zona de Cisalhamento Tentugal (HASUI; ABREU; VILLAS, 1984). Segundo Klein et al. (2005a), essa estrutura representa um limite geocronológico (Rb-Sr, K-Ar) e litoestrutural, isto porque parte significativa do Fragmento Cratônico São Luís foi retrabalhada no Neoproterozóico e forma importante porção do embasamento do Cinturão Gurupi.

Figura 3 – Mapa geológico regional, destacando a área do levantamento aerogeofísico do Gurupi e unidades geológicas descritas.



Fonte: CPRM, 2003

2.1.1 Fragmento Cratônico São Luís

O Fragmento Cratônico São Luís é formado subordinadamente por uma sequência de rochas metavulcanossedimentares e predominantemente por conjuntos de granitóides, ambos paleoproterozóicos e formados no Riaciano. A sucessão metavulcanossedimentar, denominada de Grupo Aurizona, é a unidade mais antiga do fragmento Cratônico (2240 ± 5 Ma), constituída por xistos de naturezas diversas, rochas metavulcânicas ácidas a básicas e quartzitos e metachert subordinados atribuídos a ambiente de arcos de ilhas (Pastana, 1995; Klein et al., 2005a; Klein et al., 2008b).

Um dos conjuntos de granitoides aflora na zona limítrofe entre o Fragmento Cratônico e o Cinturão Gurupi, é representado pela suíte intrusiva Tromai, composta por tonalitos, granodioritos e granitos de idade entre 2168 e 2148 Ma (Klein; Moura, 2001; Klein et al., 2005a; Klein et al., 2008b). Outro conjunto de granitoides é representado pela Suíte Tracuateua, constituída por granitos peraluminosos com duas micas (LOWELL, 1985; COSTA, 2000), formados entre 2086 e 2091 Ma (PALHETA; ABREU; MOURA, 2009) e o Granito Negra Velha, constituído por pequenos plútons (potássicos a shoshoníticos) que intrudiram os granitoides da Suíte Tromai entre 2056 e 2076 Ma (Klein et al., 2008b).

2.1.2 Cinturão Gurupi

O Cinturão Gurupi é um orógeno neoproterozóico de orientação NNW-SSE desenvolvido na borda sul-sudoeste do Cráton São Luís (ALMEIDA; HASUI; BRITO NEVES, 1976; COSTA, 2000; KLEIN et al., 2005a). Possui área aflorante de aproximadamente 160 km de extensão longitudinal e 50 km de largura e parte dos demais limites estão encobertos por sedimentos fanerozóicos. Dados geofísicos, de petrografia e geocronologia de rochas do embasamento indicam que o Cinturão Gurupi se estende ainda 60-80km para sul e até 500km na direção leste-oeste sob essas bacias (Brito Neves et al., 1984; Cunha, 1986; Nunes, 1993; Castro et al., 2014).

O Cinturão Gurupi é composto por sequências metassedimentares e metavulcanossedimentares, gnaisses e diversas gerações de rochas plutônicas. Uma parte significativa dessas rochas possui idade paleoproterozóica e representa fragmentos

retrabalhados da borda cratônica e porções do embasamento sobre o qual se ergueu o cinturão orogênico neoproterozoico (KLEIN et al., 2005a).

A porção retrabalhada da borda cratônica inclui os granitóides cálcio-alcálicos da Suíte Intrusiva Tromaí e as rochas supracrustais da Formação Chega Tudo, formadas entre 2167 e 2148 Ma (KLEIN et al., 2005a). Associada a Formação Chega Tudo, ocorre a formação Igarapé de Areia (<2100 Ma), deformada, embora ocorra também indeformada no Fragmento Cratônico São Luís.

Corpos isolados do Metatonalito Igarapé Grande, de 2594 ± 3 Ma, e ortognaisses e paragneisses foliados e bandados do Complexo Itapeva, de 2167 Ma representam o complexo metamórfico do embasamento (KLEIN et al., 2005a; KLEIN; LOPES, 2011). Intrudindo o conjunto sedimentar ocorrem corpos de granitóides com assinatura de alto potássio, como Cantão (2163 ± 4 Ma), Anelis (2100 ± 21 Ma) e Timbozal (2084 ± 5 Ma). Já os corpos Japiim, Tamancuoca, Moça, Maria Suprema e Jonasa são compostos por granitos peraluminosos, com idade em torno de 2100 Ma. (PASTANA, 1995; KLEIN et al., 2005a, 2009, 2012; PALHETA; ABREU; MOURA, 2009; KLEIN; LOPES, 2011).

A ocorrência de rochas de idade Neoproterozóica no Cinturão do Gurupi é limitada e pontualmente representada pelo Nefelina Sienito Boca Nova, que ocorre próximo à cidade de Garrafão do Norte – PA, que representa uma intrusão anorogênica ou pré-orogênica de 732 ± 7 Ma ligada ao quebramento continental ocorrido no início do Neoproterozóico, que daria origem ao orógeno Gurupi (KLEIN et al., 2005a). Outras ocorrências são o Metamicronalito Caramujinho, de 624 ± 16 Ma e o Granito Ney Peixoto, de 549 ± 4 Ma.

As sequências metassedimentares associadas a uma margem continental passiva possuem grande expressão areal no Cinturão Gurupi, eram denominadas de Grupo Gurupi, consideradas mais jovens que 1100 Ma (KLEIN et al., 2005a; KLEIN; LOPES, 2011 e suas referências). Trabalhos desenvolvidos em 2015, mapeamento da Folha Santa Luzia do Pará (Klein et al., 2015), provocaram o reordenamento das sequências em três unidades distintas, uma paleoproterozóica (Formação Santa Luzia do Pará), de ambiente tectônico incerto, e duas de idade indefinida (Grupo Gurupi Indiviso e Formação Cabeça de Porco), mas limitadas ao intervalo 563 a 2000 Ma e de provável deposição em margem passiva, que posteriormente inverteu para margem ativa durante a orogenia que inverteu o Cinturão Gurupi (COSTA, 2000; KLEIN; LOPES, 2011). Pequenas bacias sedimentares, aparentemente instaladas sobre rochas do Fragmento Cratônico São Luís e do Cinturão Gurupi (formações Vizeu, Igarapé de Areia e Piriá), têm sido consideradas coberturas pós-orogênicas (molassas?) relacionadas ao final da orogenia que ergueu o Cinturão Gurupi no final do Neoproterozóico ou início do

Cambriano (ABREU;VILLAS; HASUI, 1980; KLEIN et al., 2005a; PINHEIRO; MOURA; KLEIN, 2003).

2.1.3 Coberturas Sedimentares Fanerozóicas

As coberturas sedimentares Fanerozóicas, que recobrem parcialmente os domínios pré-cambrianos, compreendem as bacias do Parnaíba, Grajaú e Bragança-Viseu.

A Bacia do Parnaíba constitui uma grande sinéclise com até 3500 metros de espessura que se implantou sobre riftes cambro-ordovicianos desenvolvidos no embasamento pré-cambriano. Este embasamento é representado por segmentos dos crátons São Francisco e São Luís e das faixas móveis neoproterozóicas Gurupi, Araguaia e Borborema (GÓES; FEIJÓ,1994; BRITO NEVES, 2002). É limitada ao norte pelo Arco Ferrer-Urbano Santos e a nordeste é recoberta por sedimentos mesozóicos das bacias São Luís, Grajaú e Bragança-Viseu e sedimentos cenozóico. Abriga sequências sedimentares formadas no Paleozóico e no Mesozóico. As Siluro-Devonianas, mais antigas, relacionam-se a transgressões marinhas, enquanto que a partir do Carbonífero o ambiente é continental quente e árido, com mares restritos e rasos, evoluindo para desértico no início do Mesozoico. Também no Mesozoico é registrado o magmatismo continental básico relacionado com a abertura do Oceano Atlântico (GÓES; FEIJÓ, 1994; MILANI; TOMAZ FILHO, 2000).

A Bacia do Grajaú possui forma semicircular e corresponde às sequências cretáceas depositadas sobre as sequências paleozóicas da Bacia do Parnaíba.

Bragança-Viseu é uma bacia sub-aflorante recoberta pelas coberturas cenozóicas do Grupo Barreiras e definida principalmente com apoio de dados gravimétricos, sísmicos e de sondagem. Representa um dos riftes da margem Atlântica Equatorial formada no Cretáceo.

2.1.4 Coberturas cenozóicas

As coberturas cenozoicas são representadas pelos sedimentos do Grupo Barreiras, que tem a sua porção basal representada pela Formação Pirabas (ARAI M., 2006). Sobrepondo

todas as unidades mais antigas ocorrem sedimentos inconsolidados e crostas lateríticas de idade Terciária / Quaternária.

O Grupo Barreiras tem extensa ocorrência areal na porção nordeste do estado do Pará, recobrando discordantemente as rochas arqueanas / proterozóicas. A porção basal do Grupo Barreiras, nesta região, é representada pela Formação Pirabas, do Mioceno. Esta formação é uma sequência marinha constituída por arenitos, argilitos pretos, margas e calcários; enquanto o Grupo Barreiras é constituído por conglomerados, argilitos, siltitos e arenitos, de origem continental.

As rochas lateríticas envolvem lateritos maduros e imaturos, além daqueles alóctones denominados de “linhas de pedras”. Os lateritos maduros formaram-se no Terciário, enquanto os imaturos estabeleceram-se no Quaternário. Os lateritos maduros se caracterizam por perfis melhor diferenciados em horizontes do que os imaturos. As rochas geradoras são de diferentes idades e composições petroquímicas, e produziram diversos tipos de lateritos, com destaque maior para os bauxíticos, os fosfáticos, os ferruginosos, os caulíníticos, os manganésíferos e os níquelíferos. A cobertura mais comum é do tipo Argila de Belterra, representada por material de aspecto argiloso e amarelo, proveniente do intemperismo de perfis lateríticos. Pedras de ferro não-lateríticas são comuns na região, dentro dos perfis lateríticos ou não (COSTA, 1991).

2.2 Evolução Geotectônica

No Riachão, entre 2240 e 2000Ma foi estruturalmente estabelecido o chamado Fragmento Cratônico São Luís, como parte de um orógeno maior, sendo que este fragmento é hoje entendido como uma pequena parte do Cráton Oeste Africano que ficou no continente Sul americano após a quebra continental mesozóica que gerou América do Sul e África (HURLEY et al., 1967; TORQUATO; CORDANI, 1981; LESQUER; BELTRÃO; ABREU, 1984; KLEIN; MOURA, 2008). As sequências supracrustais e os granitóides cálcico-alcalinos são relacionados a uma fase acrescionária da orogenia, os granitóides peraluminosos à fase colisional, e os granitóides evoluídos e as rochas vulcânicas mais jovens a fases tardi a pós-orogênicas (KLEIN et al., 2008b; KLEIN et al., 2009).

A zona móvel, que bordeja a porção sul-sudoeste do Cráton, é constituída pelo Cinturão Gurupi, orógeno Neoproterozoico de orientação NNW-SSE do Cráton e causou

retrabalhamento das rochas no limite cratônico e inversão dos sedimentos marinhos plataformais. As sequências do Cinturão são interpretadas como uma associação de margem continental passiva desenvolvida na borda do Fragmento Cratônico São Luís, que posteriormente inverteu para margem ativa durante a orogenia que soergueu o Cinturão Gurupi (COSTA, 2000; KLEIN; LOPES, 2011).

A consolidação de terrenos estáveis no final do Neoproterozóico (Ediacarano) e início do Cambriano, ao término do ciclo Brasileiro/Pan-Africano de orogenias (500 Ma), foi seguida por eventos tectônicos, sedimentares e magmáticos relacionados aos estágios de transição, estabilização e reativação da Plataforma Sul-Americana (ALMEIDA, 1969; ALMEIDA; BRITO NEVES; CARNEIRO, 2000). Esses estágios são representados, respectivamente, pela formação de riftes intracontinentais, implantação das grandes sinéclises intracratônicas do Paleozóico e abertura do Oceano Atlântico. Todos esses estágios estão representados pelas coberturas sedimentares Fanerozóicas na Província Parnaíba.

2.3 Geofísica Terrestre aplicada a fosfato – Gamaespectrometria

De acordo com ASHFAHANI (2002), a gamaespectrometria é uma ótima ferramenta na geofísica de exploração, tendo-se como exemplo um trabalho realizado na mina de Khneifiss, na Síria. Neste, a gamaespectrometria foi utilizada para investigar radiação e camadas de fosfato. A interpretação radiométrica usando métodos numéricos de análise apresentou uma boa correlação em algumas áreas fosfáticas na Síria, sendo possível a definição precisa de espessura de fosfatos na área de estudos. Foram analisadas sessenta e três amostras de camadas de fosfato em furos de sondagem com gamaespectrometria para determinação de P_2O_5 , U, Th e K, sendo encontrada uma boa correlação entre o conteúdo de P_2O_5 e U.

Outro resultado importante mostrado por ASHFAHANI (2002) foi a intensidade de radioatividade nas camadas de fosforitos, que variaram entre 130 cps e 383 cps, com média de 270 cps e desvio padrão 57 cps. Neste mesmo trabalho o autor coloca que o conteúdo de P_2O_5 dentro das camadas fosfáticas variam entre 15% e 34,6%, e a concentração de U entre 42 ppm e 130 ppm, com média de 94 ppm, e desvio padrão 20,3 ppm. Na análise do conteúdo de P_2O_5 , concentração de U e radioatividade natural, observou-se que a intensidade de raios

gama medidos nas camadas fosfáticas está diretamente relacionada à concentração de urânio (ASHFAHANI, 2002).

De acordo com a experiência do autor deste trabalho, atualmente as empresas de prospecção mineral com foco em mineralizações fosfáticas, tem usado a gamaespectrometria terrestre na delimitação de ocorrências minerais conhecidas, com o objetivo de detalhar em superfície a extensão da mineralização. A delimitação contribui e orienta os trabalhos de prospecção direta, como trincheiras, poços, furos de trado e sondagem rotatitava, diminuindo os custos e tornando o trabalho mais prático.

2.4 Aerogeofísica aplicada a fosfato – Gamaespectrometria

A principal aplicação dos levantamentos de dados com geofísica aérea tem sido o mapeamento geológico, o que teve seus interesses impulsionados pela indústria mineral. Os levantamentos aerogeofísicos recobrem extensas áreas em um curto espaço de tempo, produzindo assim dados importantes para o entendimento geológico e, integrado a outros temas, fornecendo conhecimento suficiente para a descoberta de novos alvos potenciais que serão checados em campo.

Os raios gama são uma forma de radiação eletromagnética de alta energia e pequeno comprimento de onda, sem massa ou carga eletrônica e que emitem diferentes níveis de energia ou picos que correspondem ao decaimento radioativo de alguns radioelementos (WILFORD et al., 1997). A estimativa de concentração ou quantidade destes radioelementos no solo ou nas rochas é feita pela intensidade dos picos de radiação de cada um.

A espectrometria aérea ou terrestre mede a quantidade de potássio (K), tório (eTh) e urânio (eU) nas rochas ou minerais de intemperismo pela detecção da radiação gama natural emitida pelos isótopos de decaimento radioativos destes três elementos. Usualmente U e Th são expressos em partes por milhão equivalente (eU e eTh), o que indica que suas concentrações são inferidas por elementos filhos em suas cadeias de decaimento; o K por causa de sua elevada concentração na natureza, é expresso em porcentagem (WILFORD et al., 1997).

Segundo (WILFORD et al., 1997), noventa por cento da emissão dos raios gama provem dos primeiros 30 a 45cm de solo ou rocha (DICKSON & SCOTT, 1997); 50cm para IAEA (2003). A intensidade de emissão dos raios gama da superfície revela a mineralogia e

geoquímica do embasamento e a natureza do intemperismo. A estimativa de potássio na crosta é de 2,5%, o tório possui uma estimativa de concentração nas rochas da crosta de 12ppm e o urânio, de 3ppm (WILFORD et al., 1997; DICKSON & SCOTT, 1997). Os teores dos radioelementos podem ser susceptíveis a efeitos ambientais, pedogenéticos, geomorfológicos, geoquímicos e variações litológicas, podendo aumentar ou diminuir a intensidade dos raios gama (DICKSON & SCOTT, 1997; MINTY, 1996; WILFORD et al., 1997).

A gamaespectrometria tem sido usada principalmente como uma ferramenta na exploração mineral na localização de depósitos de U e mapeamento litológico. Segundo WILFORD et al.(1997), as respostas gamaespectrométricas sobre as rochas são bem entendidas, porém a distribuição dos radioelementos em materiais de intemperismo ainda precisam ser melhor estudados. WILFORD et al. (1997) sugere como forma de análise e interpretação, que as imagens gamaespectrométricas geradas sejam sobrepostas ao modelo digital do terreno (MDT) para verificar as distribuições dos teores dos radionuclídeos em relação aos elementos do relevo (dispersão).

NORDEMANN (1966, in FERREIRA et al., 1992), em estudos anteriores, demonstrou que rochas calcárias geralmente apresentam baixos teores de elementos radioativos, permitindo com isso um contraste com as rochas mineralizadas na região, uma vez que as rochas calcárias são as encaixantes dos fosforitos, e que a apatita na maioria das vezes possui um teor elevado de U e Th (IAEA, 2003).

MANÉ (1998) utilizou em sua dissertação a gamaespectrometria e o sensoriamento remoto para caracterizar geofisicamente mineralizações de fosfato em Irecê na Bahia, tendo como resultado a obtenção de uma importante correlação entre o tório e as mineralizações descritas pela CBPM (Companhia Baiana de Pesquisa Mineral), o que não ocorreu com o urânio, uma vez que este foi lixiviado das regiões onde ocorrem as mineralizações.

3 GEOLOGIA LOCAL

Nesse item serão descritas a geologia e geomorfologia da região que engloba as ocorrências de laterita fosfática denominadas Sapucaia, Boa Vista, Serrote, Serrotinho, Caeté e Tracuá. Essas ocorrências localizam-se nas áreas de prospecção da empresa Phosfaz Fertilizantes Ltda.

Vale ressaltar que essa região servirá de padrão para comparação com outras áreas potenciais, uma área “corpo de prova”, mesmo que ela não englobe todas as ocorrências utilizadas para o desenvolvimento de uma assinatura geofísica para as lateritas fosfáticas, foco desse trabalho.

3.1 Contexto geomorfológico

A área de pesquisa apresenta predominantemente um relevo suave que reflete as rochas sedimentares horizontalizadas que a compõe. As elevações na área representam superfícies lateritizadas que podem ser representadas tanto por fosfatos aluminosos, quanto por lateritas ferruginosas. Nas porções com relevo mais plano e baixo predominam argilitos e arenitos cobertos por areias residuais. Os afloramentos são muito raros.

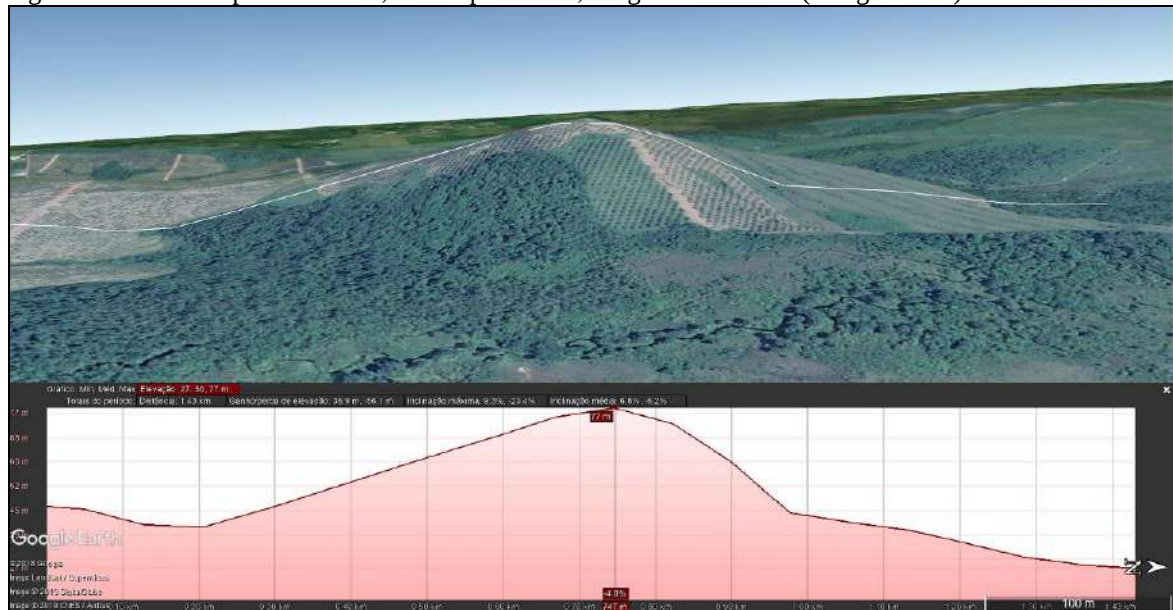
Bons exemplos de relevo sustentado por fosfato aluminoso são representados pelos depósitos Sapucaia e Serrote. O primeiro consiste em um morrote isolado com aproximadamente 700 metros de comprimento, na direção N-S, e 390 metros na direção E-W, sendo que a diferença entre as cotas de base e topo é de aproximadamente 30 metros (Fig. 4). O segundo é formado por uma elevação de forma arredondada com diâmetro de 500 metros e 20 metros de desnível (Fig. 5).

Figura 4 - Vista aérea do depósito de Sapucaia.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 5 - Vista do depósito Serrote, visada para oeste, exagero vertical 3x (Google Earth)



Fonte: Google Earth, 2019.

Estas elevações são sustentadas por uma camada sub-horizontalizada de fosfato aluminoso e circundadas por solos arenosos derivados do intemperismo de arenitos.

Regionalmente, a região NE do Pará apresenta relevo plano, levantamento ondulado, as elevações variam entre 60 a 100 metros. Os morrotes quando não sustentados por lateritos fosfáticos, são compostos por latossolos amarelos que cobrem perfis de lateritos jovens e imaturos que estão completos ou truncados pela erosão.

Considerando a situação geográfica no Brasil, o depósito é próximo a foz do Rio Amazonas, como também da costa atlântica, que contribuem para erosão e processos sedimentares de modelagem da paisagem.

3.2 Contexto Geológico local

A região de Bonito/Capanema/Ourém-PA, concentra todas as ocorrências utilizadas para descrição da geologia local. Ela está cartografada, nos mapas geológicos disponíveis, como formada pelo Grupo Barreiras. As sondagens realizadas pela Phosfaz fertilizantes tem mostrado que predominam rochas da Formação Pirabas, do Mioceno, tais como argilitos, calcários e fosforitos; que constitui a base do Grupo Barreiras. As rochas Pirabas distribuem-se desde a região de Bonito - Capanema até a costa atlântica, comumente sob uma camada arenosa inconsolidada superficial. As ocorrências de calcários localizadas a norte de Capanema, da Formação Pirabas, são lavradas atualmente pela Cibrasa (Cimentos Nassau) e pela Votorantim S/A em Primavera.

Os afloramentos são raros na região e o intemperismo é intenso formando em geral um relevo plano, em que raramente se destacam topos de morrotes, ora com concreções ferrugionosas ora fosfáticas. Nesse caso, a análise dos furos de sondagem foi de grande valia para a descrição da sucessão de horizontes das ocorrências e depósitos de laterita fosfática.

De uma maneira geral, a estratigrafia da área do Projeto Bonito é formada, da base para o topo, por:

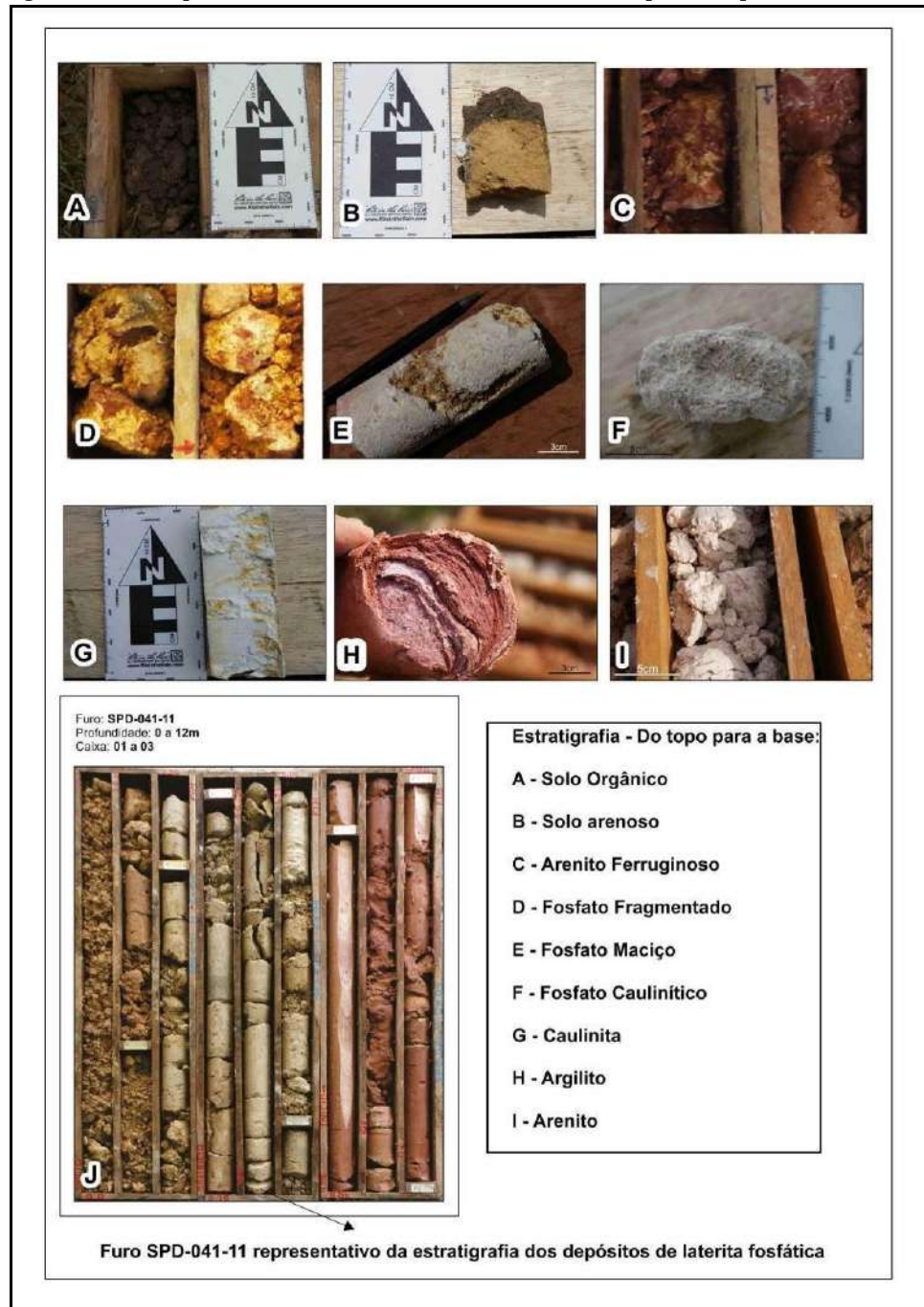
- a) Arenitos finos a médios interdigitados com margas, calcário fossilífero e folhelhos pretos;
- b) Argilito avermelhado com finas pontuações de sericita; com espessura de até 30 metros;
- c) Horizonte de caulinita branca com níveis centimétricos ricos em grãos de quartzo; tem espessura média de 5 metros podendo chegar a 12 metros;
- d) Horizonte de fosfato aluminoso maciço a fragmentado, com espessura máxima de 10 metros;
- e) Cobertura de sedimentos arenosos, localmente ferruginosos.

A seguir será feita a descrição detalhada da sucessão dos horizontes e da mineralogia das ocorrências de laterita fosfática, baseada na descrição geológica dos furos de sondagem dos depósitos de Sapucaia e Serrote, onde foram identificados e marcados os contatos entre os diferentes horizontes litológicos.

A descrição dos furos caracterizou nove tipos horizontes, descritos do topo para a base:

- a) Solo orgânico: solo castanho escuro composto predominantemente por areia fina e argila com matéria orgânica, localmente com fragmentos de laterita (Fig. 06A);
- b) Solo arenoso: solo laranja composto predominantemente por areia fina, com baixo conteúdo de argila (Fig. 06B);
- c) Arenito ferruginoso: arenito com cimento de óxido / hidróxidos de ferro, de cor vermelha a roxa (Fig. 06C);
- d) Fosfato Fragmentado: constitui a parte superior da camada do minério de fosfato, fragmentado, composto por fragmentos de fosfatos aluminosos com tamanhos variados, envoltos por uma matriz que varia de argila a areia (Fig. 06D);
- e) Fosfato Maciço: composto por fosfatos aluminosos (predominantemente crandalita / goyazita), compacto, com porções porosas; as cores variam de cinza claro ao ocre amarelado (Fig. 06E);
- f) Fosfato Caulínítico: horizonte de argila caulínítica, branco a cinza claro, contendo nódulos e fragmentos milimétricos de fosfatos aluminosos (Fig. 06F);
- g) Caulim: rocha com laminação plano paralela, branca a cinza claro com manchas amarelas e laranjas. Contém zonas ricas em sericita e, localmente com níveis areno-quartzosos (Fig. 06G);
- h) Argilito: rocha com laminação plano paralela, compacta, com pontuações de sericita. Trata-se da rocha-mãe do horizonte de caulinita (Fig. 06H);
- i) Arenito: rocha com granulometria variando de areia muito fina a grossa, de cor branca a amarelada (Fig. 06I).

Figura 6 - Furo representativo da sucessão de horizontes no Depósito Sapucaia

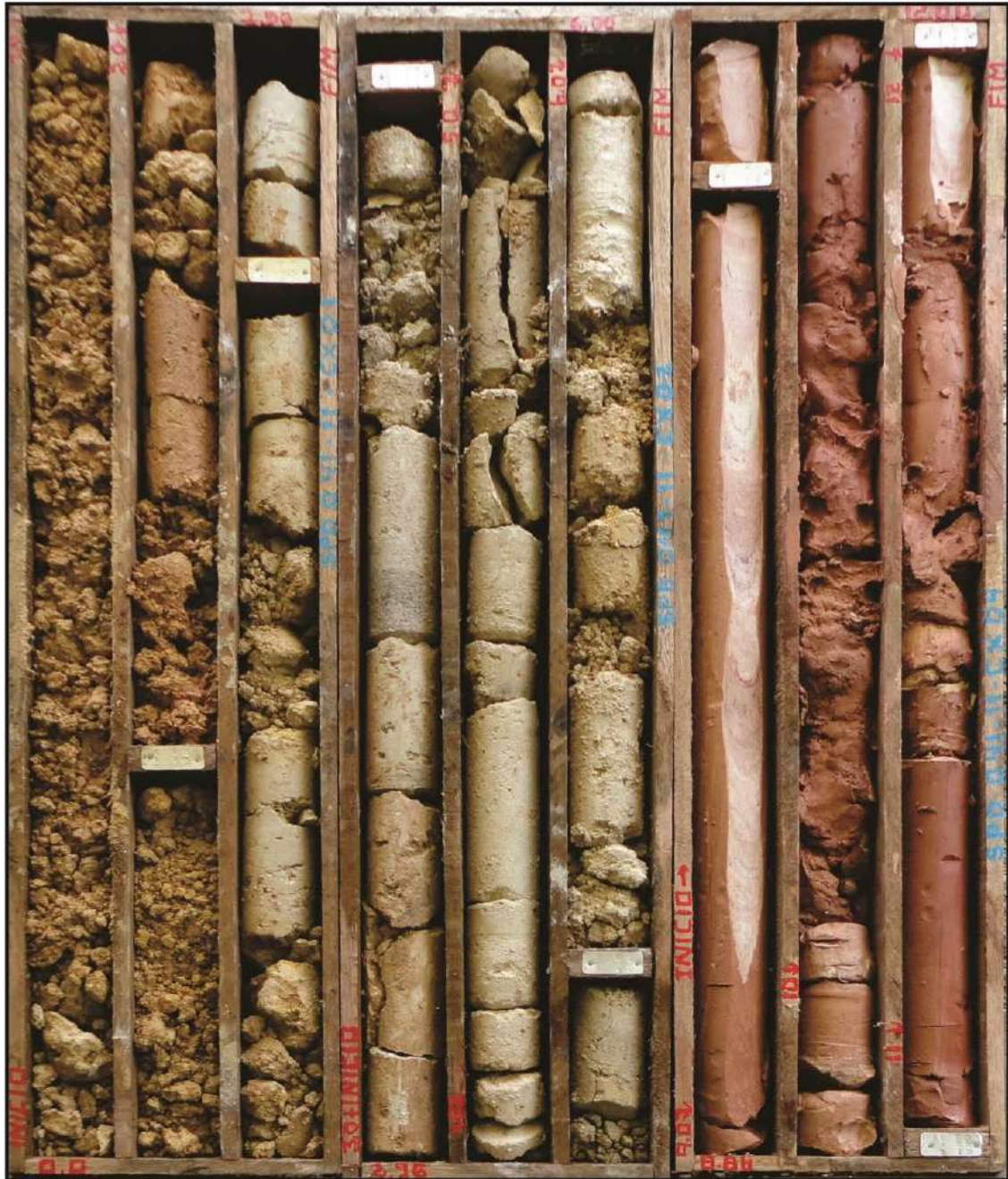


Legenda: A – Solo orgânico; B – Solo arenoso; C – Arenito Ferruginoso; D – Fosfato fragmentado; E – Fosfato maciço; F – Fosfato cauliniticos; G – Caulinita; H – Argilito; I – Arenito; J – Furo representativo.

Fonte: O autor, 2019.

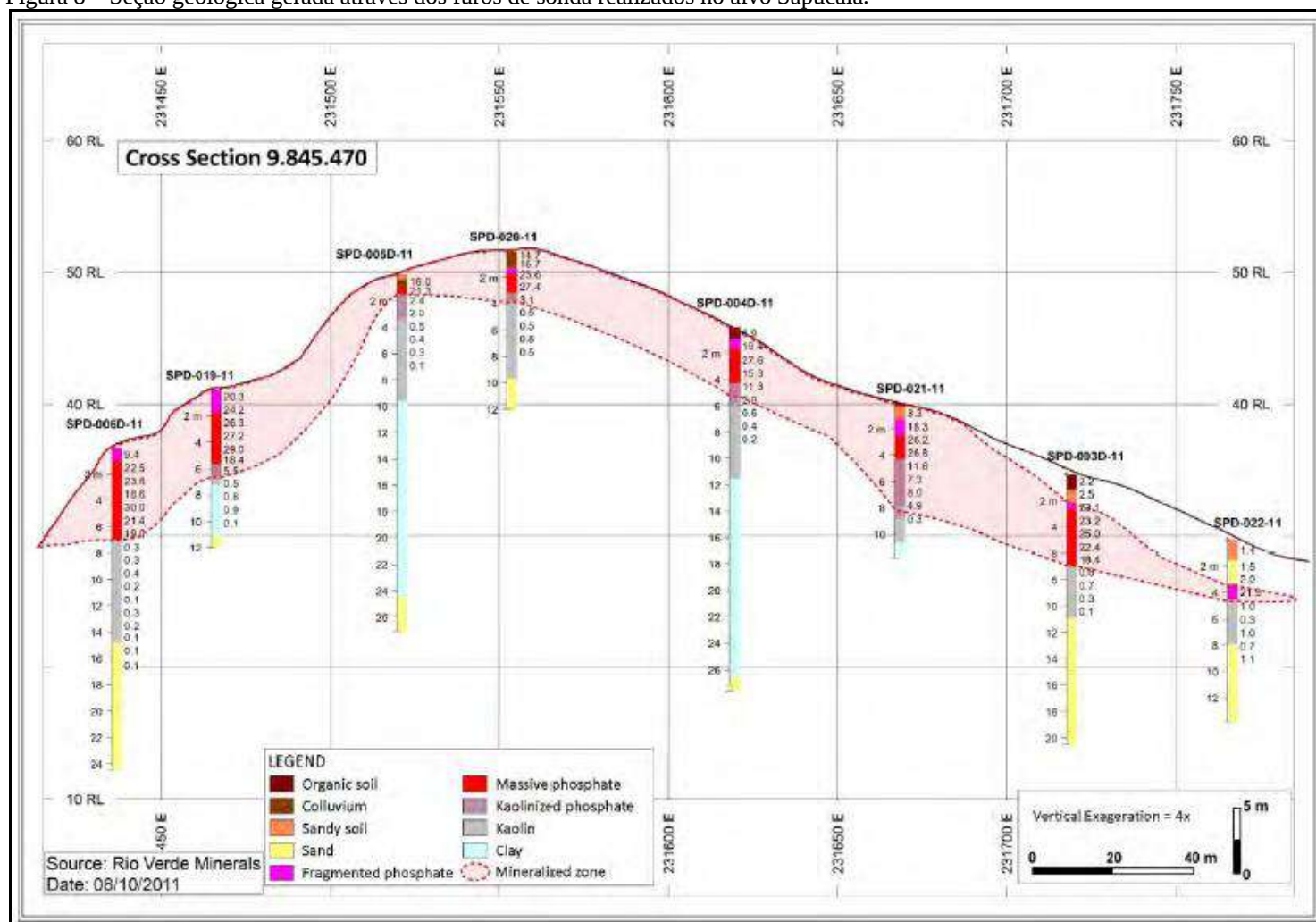
Figura 7 - Detalhe do furo que representa a sucessão de horizontes no Depósito Sapucaia.

Furo: **SPD-041-11**
Profundidade: **0 a 12m**
Caixa: **01 a 03**



Fonte: O autor, 2019

Figura 8 – Seção geológica gerada através dos furos de sonda realizados no alvo Sapucaia.



Legenda: Em vermelho a região mineralizada em fosfatos maciços e fragmentados.

Fonte: O autor, 2019

As mineralizações laterito-fosfáticas da região do Gurupi são equivalentes ao perfil laterítico do depósito de Sapucaia, constituído dos seguintes horizontes, horizonte argiloso saprolítico na base (composto principalmente por caulinita), o horizonte fosfático (crosta fosfática), que se apresenta como uma crosta compacta a parcialmente obliterada ou ainda como nódulos, e sobre esta em contato gradual, a crosta ferro-aluminosa-fosfática, brechóide, tipo pele-de-onça, bastante intemperizada e erodida. Quartzo, caulinita e muscovita, além de goethita e hematita são os principais constituintes do horizonte argiloso saprolítico, enquanto os fosfatos crandallita-goyazita, woodhouseita-svanbergita e wardita-millisita são constituintes da crosta fosfática e da crosta ferro-aluminosa fosfática (Leite, S.A.2014). É comum a associação dos elementos radiogênicos U e Th com as séries minerais citadas (Leite, S.A.2014).

Além da mineralogia, o padrão geoquímico no depósito de Sapucaia destaca a inquestionável origem laterítica e a mineralização de fosfatos aluminosos indicam que o leito de rocha era, pelo menos localmente, rico em sedimentos primários fosfatos. As concentrações de P_2O_5 , SO_3 , CaO , SrO , e Na_2O indicam enriquecimento e tipicamente formam as estruturas secundárias de fosfato (crandalita-goyazita, woodhouseita-svanvergita e wardita-millisita), que são clássicos para formações lateríticas (Costa, 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Gamaespectrometria Terrestre

4.1.1 Introdução

Foi realizada análise e processamento dos dados de detalhe obtidos através dos trabalhos de gamaespectrometria terrestre realizados pela empresa Phosfaz Fertilizantes Ltda, dados que foram cedidos pela empresa para a realização dos trabalhos.

Foram realizadas duas campanhas de levantamento radiométrico terrestre, nos depósitos de Sapucaia e Serrote. Os levantamentos foram feitos utilizando-se um espectrômetro de raios-gama do modelo RS-230 BGO (Fig.9).

A malha de pontos foi organizada em ambiente excel, cada ponto de gamaespectrometria realizado era georreferenciado com o auxílio de GPS de mão, modelo Garmin 60csx.

Figura 9 – Espectrômetro, modelo RS-230BGO



Fonte: O autor, 2019

4.1.2 Levantamento terrestre no Depósito Sapucaia

Este levantamento foi feito em malha 20 x 20m/40 x 40m, que resultou em 1.117 pontos de leitura. Dentro do corpo do corpo anômalo o espaçamento do levantamento era feito em malha 20 x 20m, e fora em malha 40 x 40m (Figura 11).

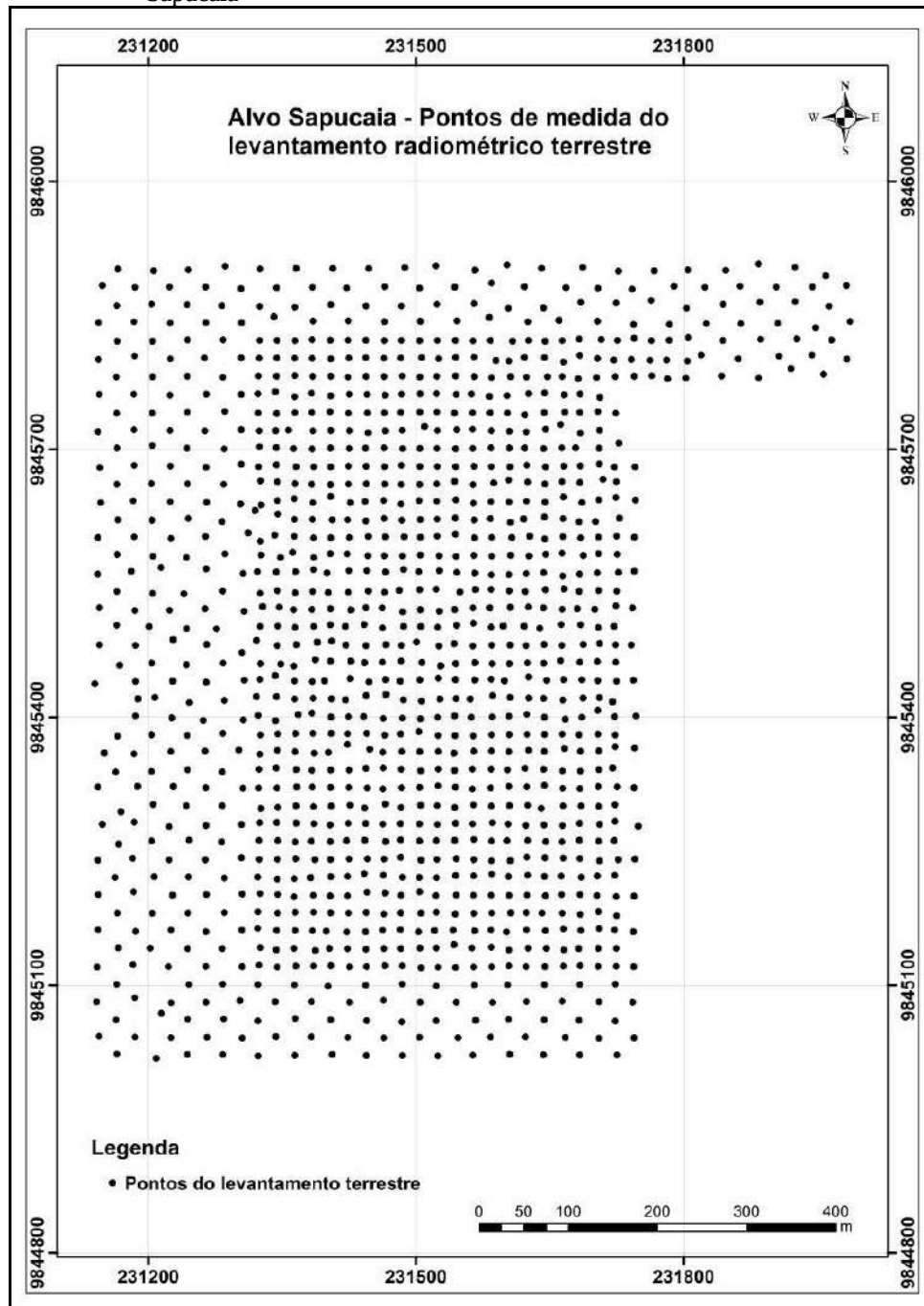
A metodologia usada neste levantamento foi com o aparelho encostado no chão (Figura 10), com cada medida feita em 90s.

Figura 10 – Demonstração da metodologia utilizada no levantamento, com o aparelho encostado no chão.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 11 – Mapa de pontos do levantamento gamaespectométrico terrestre no Depósito Sapucaia

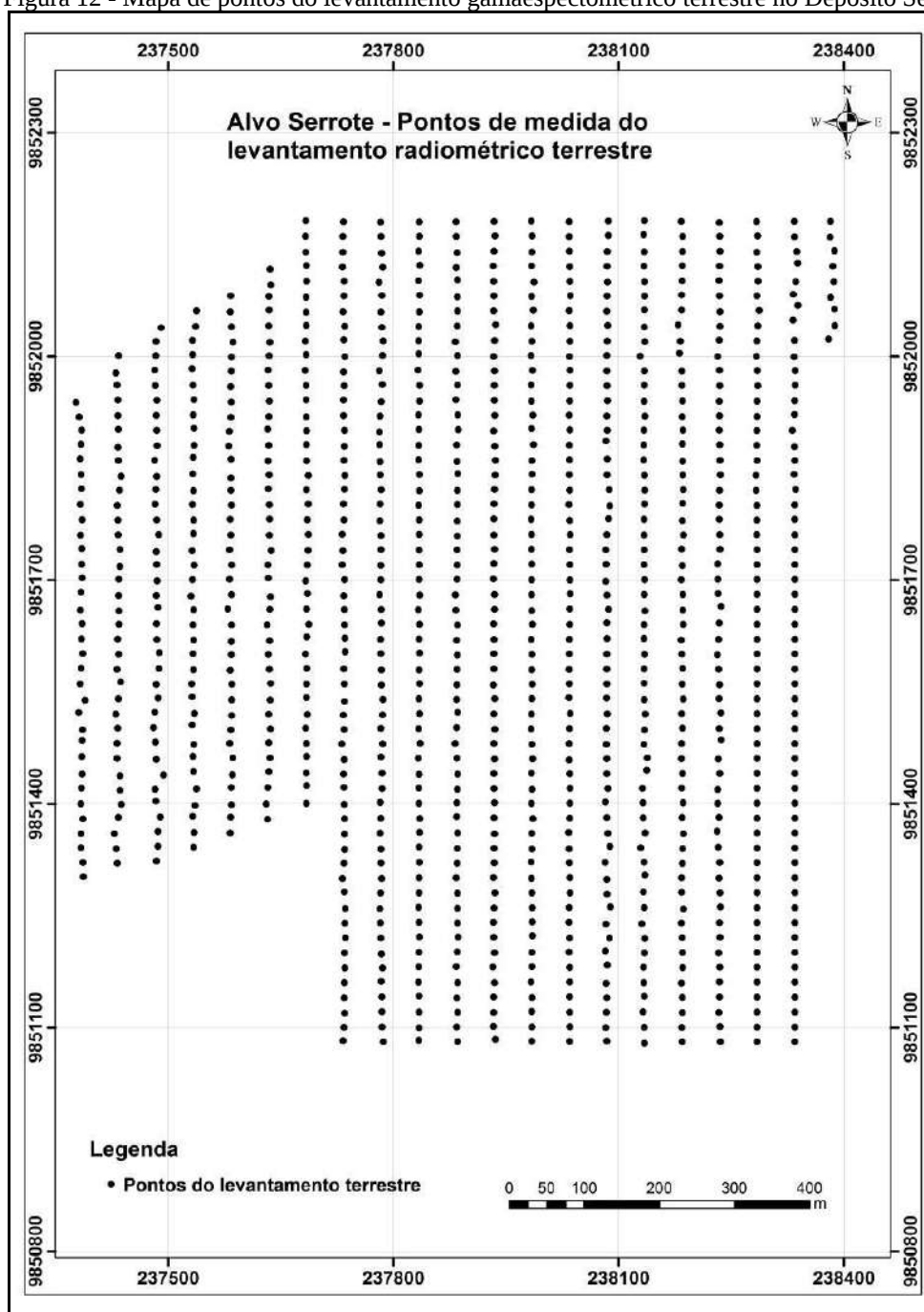


Fonte: O autor, 2019

4.1.3 Levantamento terrestre no Depósito Serrote

Este levantamento foi feito em malha 25m (N-S) x 50m (E-W), que resultou em 994 pontos de leitura (Figura 12). A metodologia usada neste levantamento foi com o aparelho distante 1,0m do chão, com cada medida feita em 90s (Figura 13).

Figura 12 - Mapa de pontos do levantamento gamaespectométrico terrestre no Depósito Serrote



Fonte: O autor, 2019

Figura 13 – Demonstração da metodologia utilizada no levantamento, com o aparelho a 1,0m do chão.



Fonte: O autor, 2019

4.1.4 Processamento dos dados e *grids*

Foram criados para os dois depósitos *grids* do canal eU, eTh, Ct, K, U/Th, U/K, Th/K e ternário.

A tabela excel desenvolvida ao final dos trabalhos continha os campos Id, data, horário da medida, temperatura, estabilização do equipamento, contagem total (ppm) e (cpm), K (ppm) e (cpm), U (ppm) e (cpm), Th (ppm) e (cpm), dosagem, unidade de dosagem e coordenadas xyz.

Com exceção das coordenadas, os outros campos são todos obtidos através da descarga dos dados do gamaespectômetro, os dados xyz foram inseridos na tabela. Os canais das razões foram inseridos no software Oasis Montaj, através dos canais de U, Th e K. A figura 14 apresenta um modelo da tabela utilizada.

Figura 14 - Modelo de tabela utilizado para organizar os dados da gamaespectrometria terrestre nos depósitos de Sapucaia e Serrote.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	ID	Date	Time	Temperature	Stabilized	Total [ppm]	Total [cpm]	K [ppm]	K [cpm]	U [ppm]	U [cpm]	Th [ppm]	Th [cpm]	Dose	Dose units	UTM_X	UTM_Y	Z	
2	26549	26/01/2012	08:57:29	24,9	1	200	848,5	0,2	63,1	1,17	26,4	3,39	28,1	18,1	nGy/h	215659	9844155	33,303	
3	26550	26/01/2012	08:57:59	24,9	1	223,8	949,7	0,23	69,4	1,33	28,5	3,1	26,1	18,5	nGy/h	215718	9843994	33,783	
4	26551	26/01/2012	08:58:28	24,9	1	204,6	868,3	0,29	82	1,12	26,4	3,64	30,2	19,7	nGy/h	215781	9843827	36,667	
5	26552	26/01/2012	08:58:58	24,8	1	242,5	1029,1	0,18	63,2	1,24	28,5	3,92	32,3	19,7	nGy/h	215818	9843729	37,629	
6	26553	26/01/2012	08:59:28	25	1	222,8	945,5	0,25	86,1	2,66	49,4	2,68	24	24,9	nGy/h	215861	9843614	38,59	
7	26554	26/01/2012	08:59:58	25	1	228,3	968,5	0,28	75,7	0,54	18,1	4,24	34,4	18	nGy/h	215919	9843456	38,59	
8	26555	26/01/2012	09:00:27	25	1	198,7	843,3	0,28	75,7	0,93	22,3	3,14	26,1	17,1	nGy/h	215978	9843293	37,148	
9	26556	26/01/2012	09:00:57	25	1	207,1	878,7	0,26	77,8	0,8	24,3	5,28	42,8	21,9	nGy/h	216040	9843123	36,187	
10	26557	26/01/2012	09:01:27	25	1	221,4	939,3	0,25	77,8	1,52	32,7	3,61	30,2	21,2	nGy/h	216106	9842942	39,071	
11	26558	26/01/2012	09:01:57	25,2	1	228,8	970,6	0,36	104,9	2,26	43,1	2,7	24	24,3	nGy/h	216173	9842758	40,513	
12	26559	26/01/2012	09:02:27	25,2	1	207,1	878,7	0,3	88,2	1,32	30,6	4,15	34,4	22,3	nGy/h	216233	9842591	42,916	
13	26560	26/01/2012	09:02:57	25,2	1	185	784,8	0,14	61,1	2,45	45,2	2,47	21,9	21,8	nGy/h	216293	9842425	44,358	
14	26561	26/01/2012	09:03:26	25,3	1	261,2	1108,4	0,19	77,8	1,72	41	6,25	51,1	28,7	nGy/h	216347	9842278	44,358	
15	26562	26/01/2012	09:03:56	25,3	1	249,4	1058,3	0,24	77,8	1,19	30,6	5,24	42,8	23,7	nGy/h	216407	9842115	40,993	
16	26563	26/01/2012	09:04:26	25,2	1	224,8	953,9	0,43	113,3	0,94	26,4	4,95	40,7	24,1	nGy/h	216467	9841950	37,629	
17	26564	26/01/2012	09:04:56	25,2	1	224,3	951,8	0,23	75,7	1,59	34,8	4,14	34,4	22,7	nGy/h	216528	9841784	41,474	
18	26565	26/01/2012	09:05:26	25,4	1	256,3	1087,5	0,14	69,4	2,02	45,2	5,97	49	28,9	nGy/h	216595	9841598	46,281	
19	26566	26/01/2012	09:05:55	25,4	1	263,7	1118,8	0,2	65,3	0,31	18,1	6,15	49	20,9	nGy/h	216655	9841435	48,203	
20	26567	26/01/2012	09:06:25	25,4	1	283,9	1204,6	0,25	94,5	1,97	47,3	7,28	59,5	33,5	nGy/h	216717	9841274	48,203	
21	26568	26/01/2012	09:06:56	25,4	1	261,7	1110,5	0,35	107	1	32,7	7,62	61,6	30,6	nGy/h	216779	9841114	46,281	
22	26569	26/01/2012	09:07:26	25,4	1	272,7	1157,2	0,31	98,6	0,61	28,5	8,73	69,8	30,9	nGy/h	216846	9840947	43,877	
23	26570	26/01/2012	09:07:56	25,4	1	274,6	1164,9	0,33	96,6	0,91	28,5	6,31	51,1	26,3	nGy/h	216912	9840781	42,435	
24	26571	26/01/2012	09:08:26	25,4	1	289,8	1229,5	0,3	100,8	1,21	36,9	8,14	65,7	32,4	nGy/h	216981	9840609	40,032	
25	26572	26/01/2012	09:08:55	25,4	1	285,8	1212,8	0,2	69,4	1,26	30,6	4,71	38,6	22,2	nGy/h	217053	9840428	34,264	
26	26573	26/01/2012	09:09:25	25,4	1	201,7	855,8	0,4	98,7	0,59	18,1	3,67	30,2	18,3	nGy/h	217129	9840237	29,938	
27	26574	26/01/2012	09:09:55	25,6	1	245,5	1041,6	0,23	86,1	2,07	45,2	5,41	44,9	28,9	nGy/h	217189	9840087	34,745	

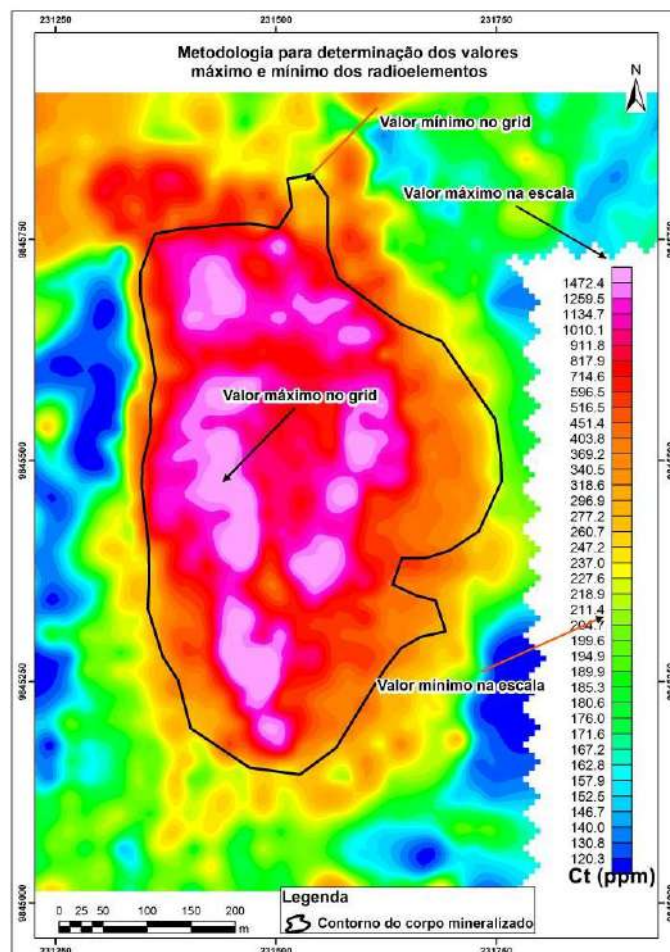
Fonte: O autor, 2019

4.1.5 Análise estatística de valores dos radioelementos sobre o contorno do corpo mineralizado

Essa análise foi feita baseada na escala obtida após a interpolação dos pontos do levantamento sobre o contorno do corpo mineralizado. Os valores máximos e mínimos dos radioelementos, foram obtidos através da relação dos grids gerados em relação ao contorno da mineralização (Figura 15).

Devido a densidade de pontos do levantamento terrestre sobre o contorno do corpo mineralizado, seria possível fazer uma estatística baseada nos pontos levantamento, mais detalhada e com descrição de mais parâmetros. Entretanto, decidiu-se manter a mesma metodologia utilizada para o levantamento aéreo (descrita no item 4.2.3), para ser possível uma comparação entre os valores dos radioelementos nos dois levantamentos, terrestre e aéreo.

Figura 15 – Metodologia para determinação dos valores máximo e mínimo dos radioelementos



Fonte: O autor, 2019.

4.2 Aerogamaespectrometria

4.2.1 Introdução

A base de dados aerogeofísicos utilizado no trabalho foi do Projeto aerogeofísico do Gurupi, executado pela CPRM em 2009, disponível para download no site da CPRM. O projeto é parte do Projeto Cartografia da Amazônia, desenvolvido pelo governo federal em 2008. O aerolevantamento foi executado no período de 22/10/2008 a 04/11/2009 e recobre a região nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão. A aeronave utilizada foi a Reims 406 Caravan II, prefixo PR-FAG.

O levantamento recobriu uma área de 35.881 km², total de 76.754,18 km de perfis de alta resolução com os métodos magnetométrico e gamaespectrométrico, com linhas de voo e controle espaçadas de 500m e 10.000m, respectivamente, orientadas nas direções N-S e E-W. A altura de vôo foi fixada em 100m sobre o terreno.

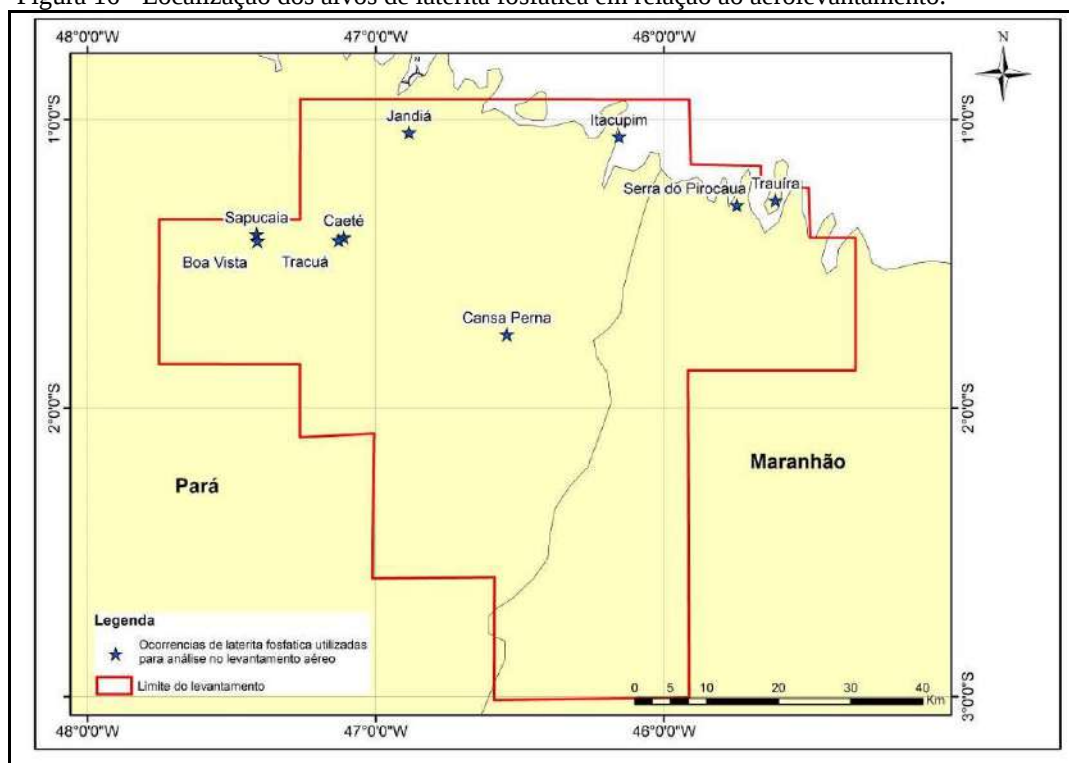
4.2.2 Processamento dos dados aerogeofísicos sobre os pontos de interesse

Através da base de dados do aerolevantamento é possível aumentar a resolução do levantamento nas áreas de interesse e também gerar mapas detalhados de todos os canais, eU, eTh, K, Contagem Total, ternário e o mapa das razões.

As ocorrências de laterita fosfática utilizadas para análise foram Sapucaia, Boa Vista, Itacupim, Serra do Pirocaua, Trauíra, Caeté, Tracuá, Cansa Perna e Jandiá. O alvo Serrote não foi utilizado, pois não é coberto pelo levantamento aéreo. Para as lateritas ferruginosas foram utilizados os Alvos Portuga e Pau Amarelo. As figuras 16 e 17, apresentam a localização dos alvos de laterita fosfática em relação ao levantamento, e a localização dos alvos de laterita ferruginosa em relação ao Depósito Sapucaia.

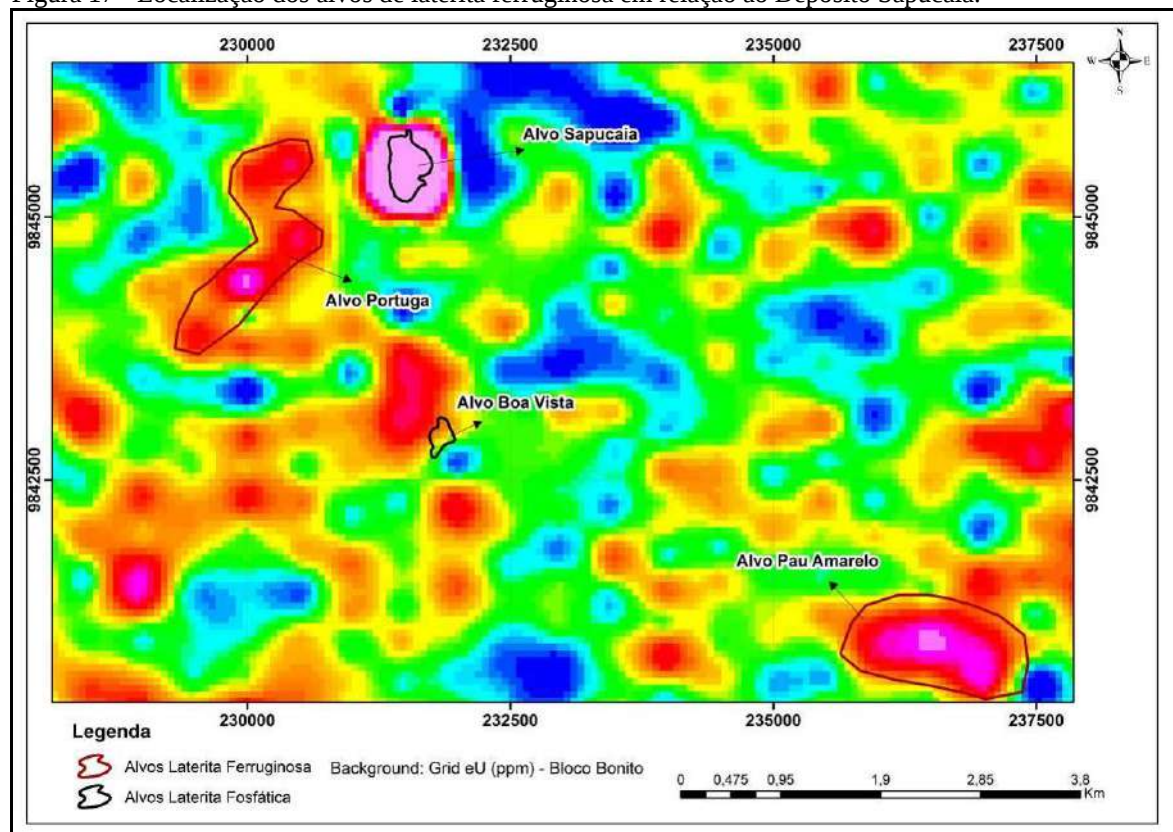
A análise da geofísica aérea, com foco nas ocorrências de laterita fosfática e ferruginosa, foi feita analisando como o levantamento se comporta sobre as ocorrências já conhecidas.

Figura 16 - Localização dos alvos de laterita fosfática em relação ao aerolevantamento.



Fonte: O autor, 2019

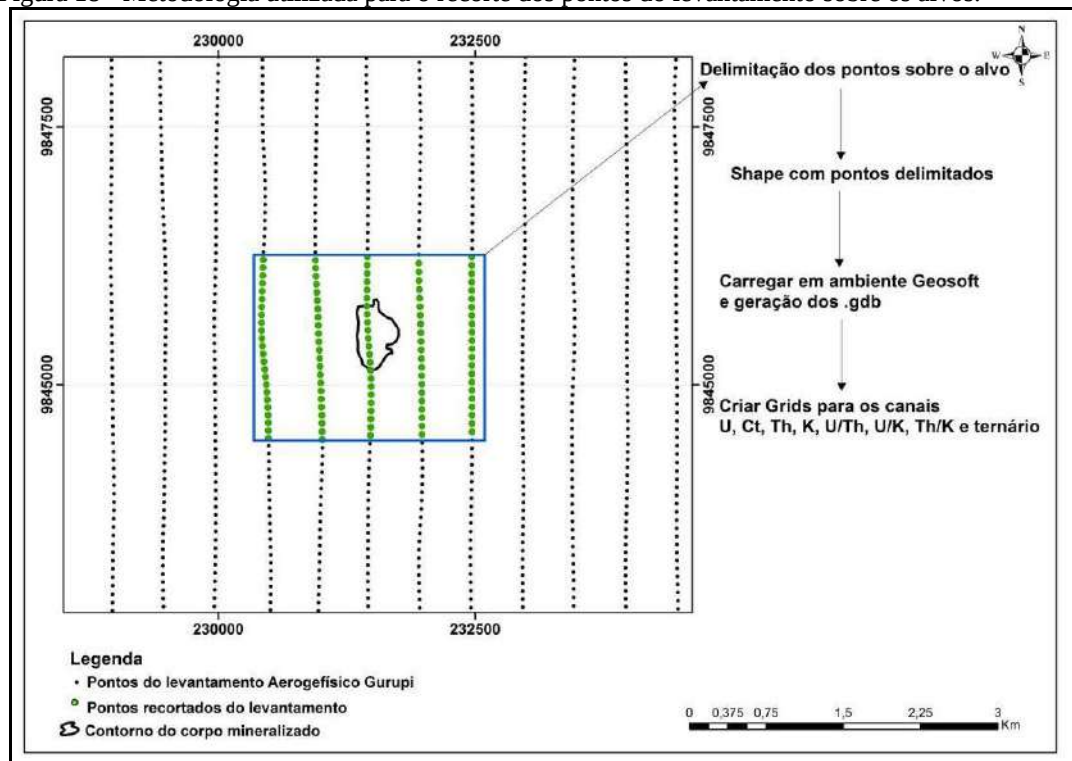
Figura 17 - Localização dos alvos de laterita ferruginosa em relação ao Depósito Sapucaia.



Fonte: O autor, 2019

A metodologia utilizada na análise do levantamento sobre os alvos, consistiu em recortar o levantamento em cinco linhas que passem sobre, ou nas vizinhanças dos alvos. Foram utilizadas cinco linhas para cada alvo, sendo que a quantidade de pontos varia de acordo com o tamanho do alvo, ou seja, o número de pontos utilizado no recorte varia de alvo para alvo, já o número de linhas permanece constante. Após recortar o levantamento sobre os alvos em ambiente *ArcGIS*, um *shape* (.shp) de pontos foi gerado para cada alvo de pesquisa. Os *shapes* foram carregados em ambiente *Geosoft* e um *.gdb* foi criado para cada alvo. A partir dos *.gdb* foi gerado para cada alvo grids no canal U, Ct, Th, K, U/Th, U/K, Th/K e ternário (Figura 18).

Figura 18 - Metodologia utilizada para o recorte dos pontos do levantamento sobre os alvos.



Fonte: O autor, 2019

4.2.3 Análise estatística de valores dos radioelementos sobre o contorno do corpo mineralizado

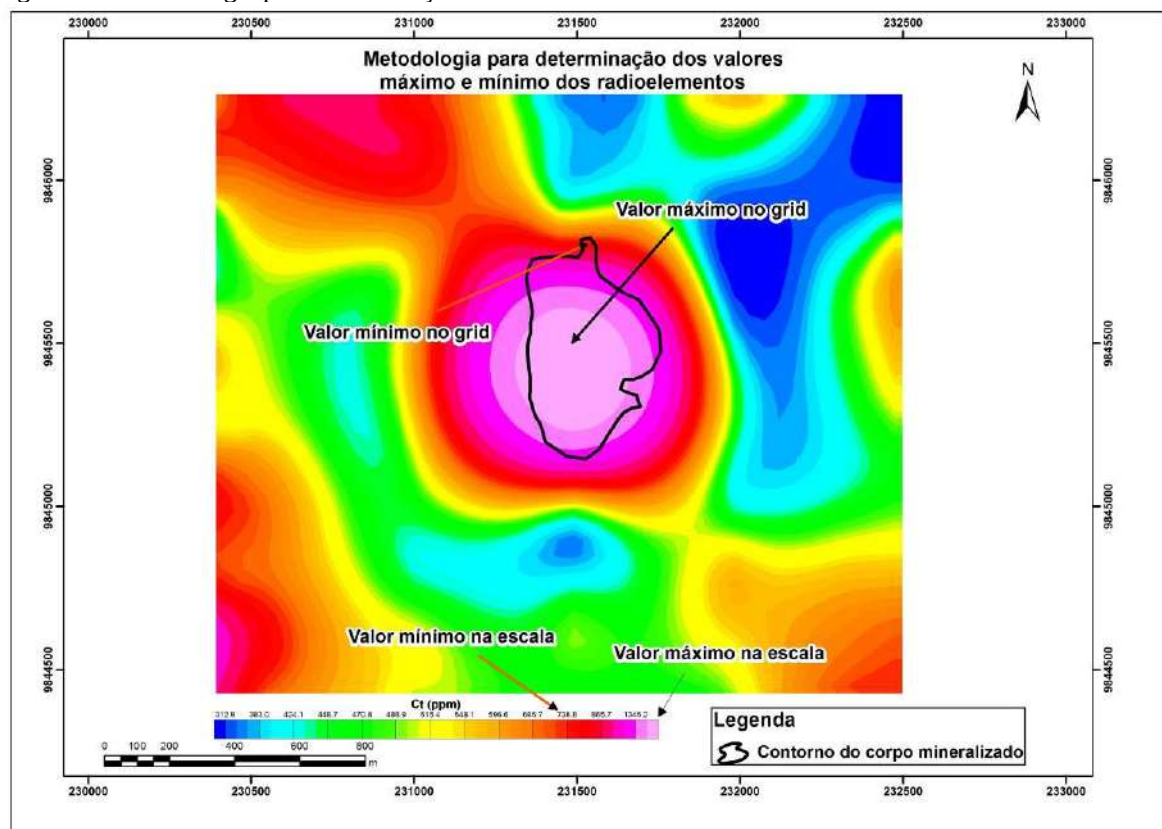
Essa análise foi feita baseada na escala de valores dos radioelementos, obtida após a interpolação dos pontos do levantamento sobre o contorno do corpo mineralizado. Os valores

máximos e mínimos, foram obtidos através da relação dos grids gerados em relação ao contorno da mineralização (Figura 19).

Esta metodologia foi definida devido o fato de poucos pontos do levantamento aéreo estarem sobre o contorno do corpo mineralizado, portanto a estatística baseada na interpolação dos pontos se torna mais eficaz do que a análise por ponto do levantamento.

Nessa estatística não foram incluídos os alvos Caeté, Tracuá, Boa vista e Cansa Perna. Essas ocorrências apresentam dimensões incompatíveis em relação ao espaçamento do levantamento.

Figura 19 - Metodologia para determinação dos valores máximo e mínimo dos radioelementos



Fonte: O autor, 2019

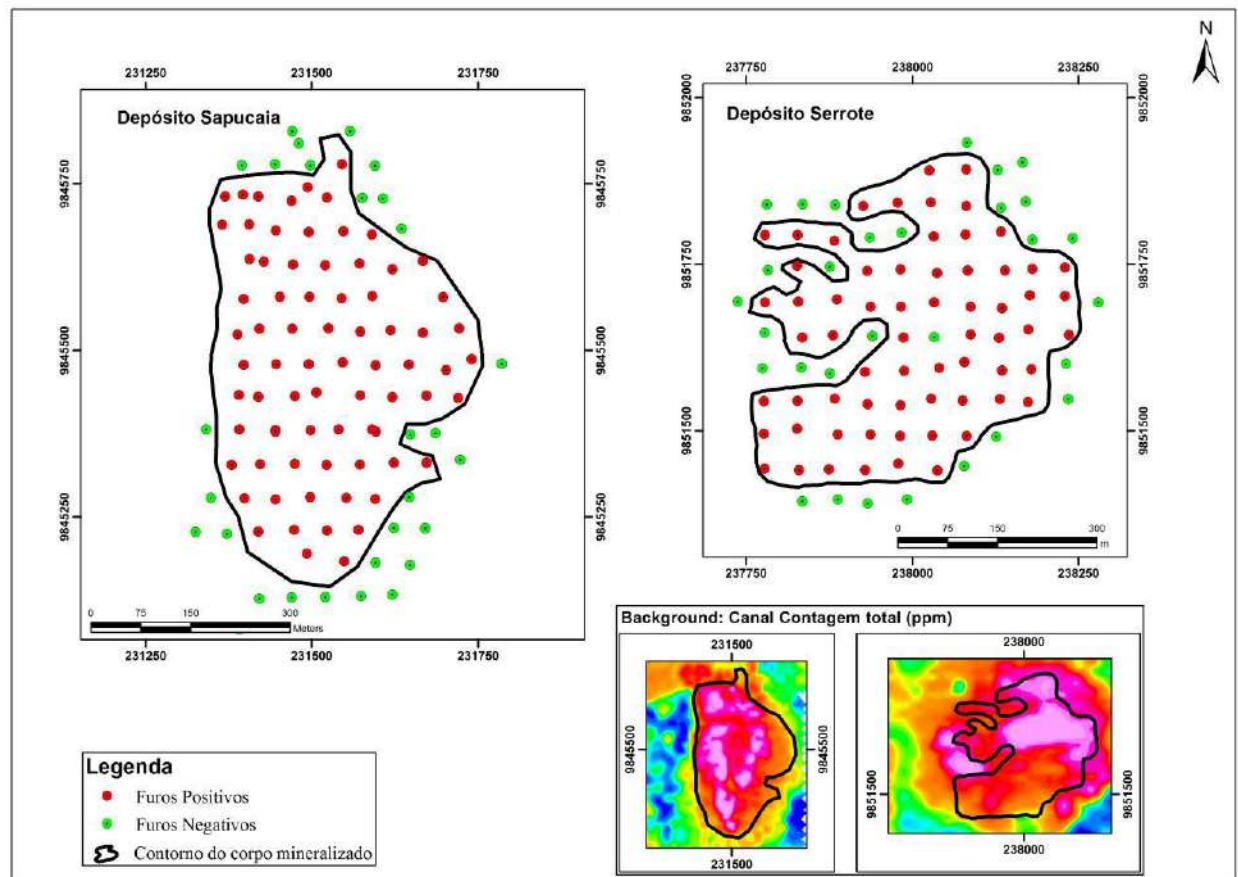
5 RESULTADOS

5.1 Gamaespectrometria terrestre

5.1.1 Grids gerados para os Depósitos de Sapucaia e Serrote

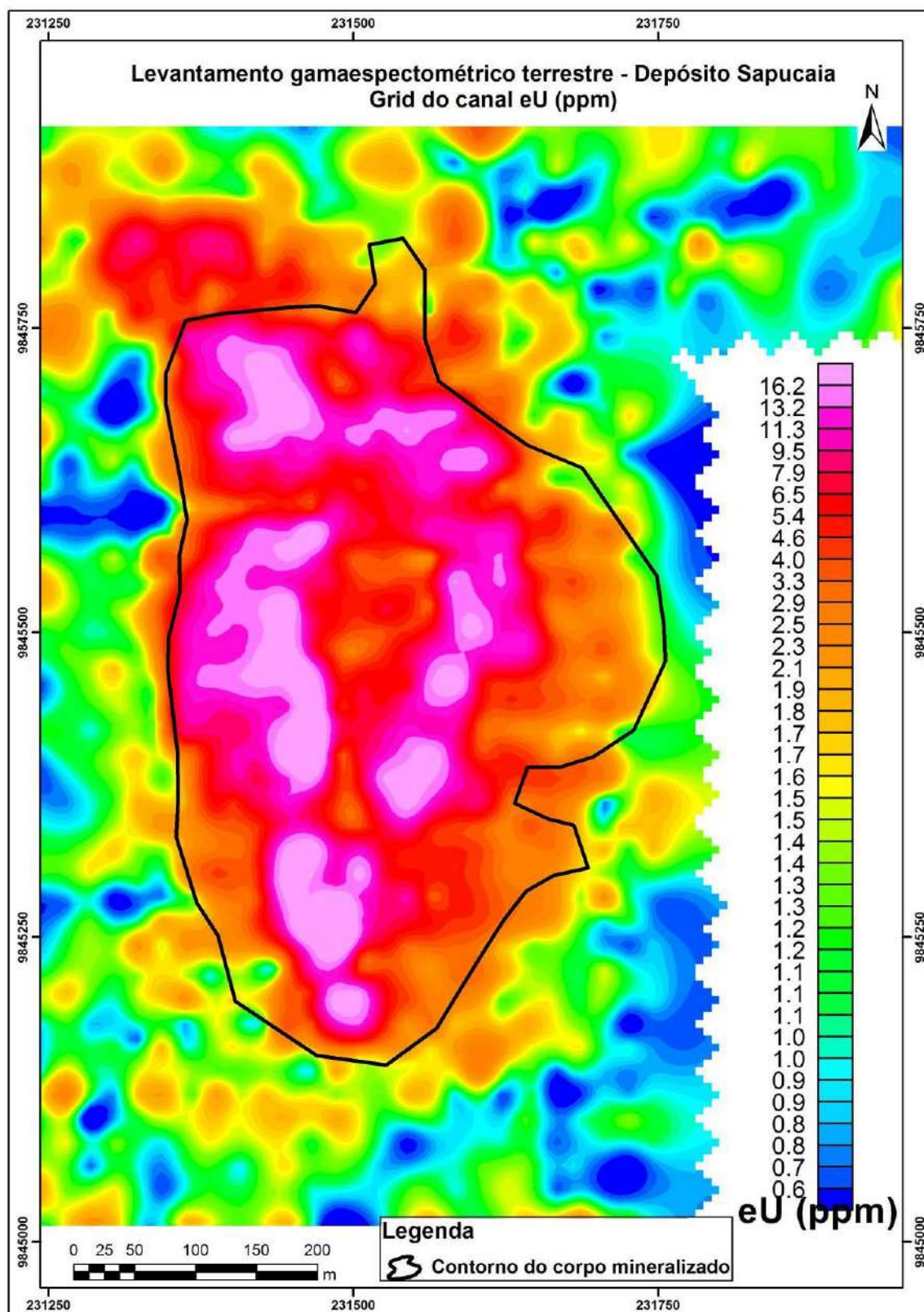
As figuras 21 a 36 apresentam os *grids* gerados para os Depósito Sapucaia e Serrote. São apresentados os mapas para os canais do eU, Ct, eTh, K, U/Th, U/K, Th/K e ternário. O contorno do corpo mineralizado é baseado em campanha de sondagem para estimativa de recurso, ou seja, o contorno é baseado nos furos de sondagem positivos, que atravessaram camadas mineralizadas, Figura 20.

Figura 20 - Metodologia para delimitação do corpo mineralizado, nos depósitos Sapucaia e Serrote.



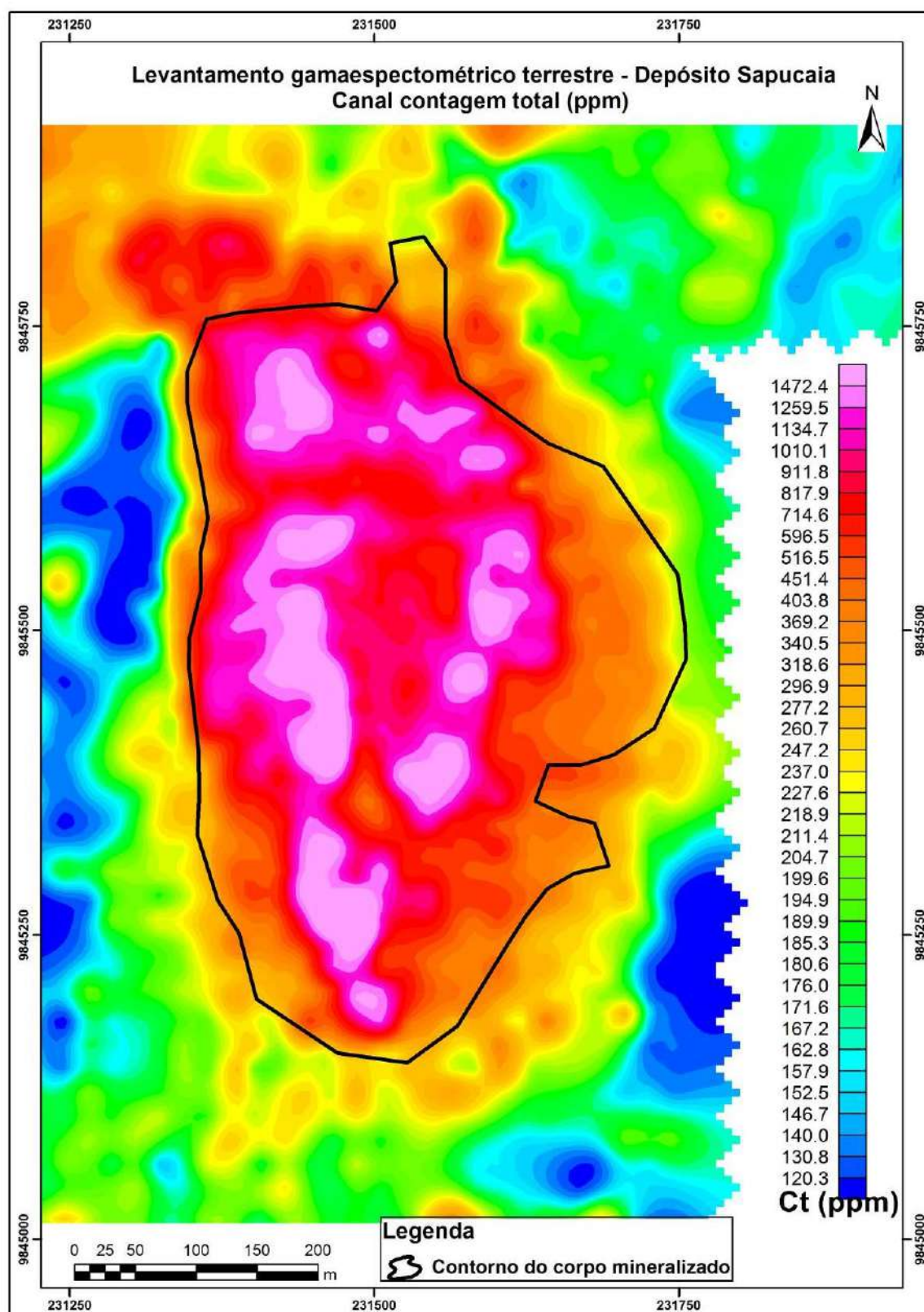
Fonte: O autor, 2019

Figura 21 - Grid do canal eU (ppm) - Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectrométrico terrestre



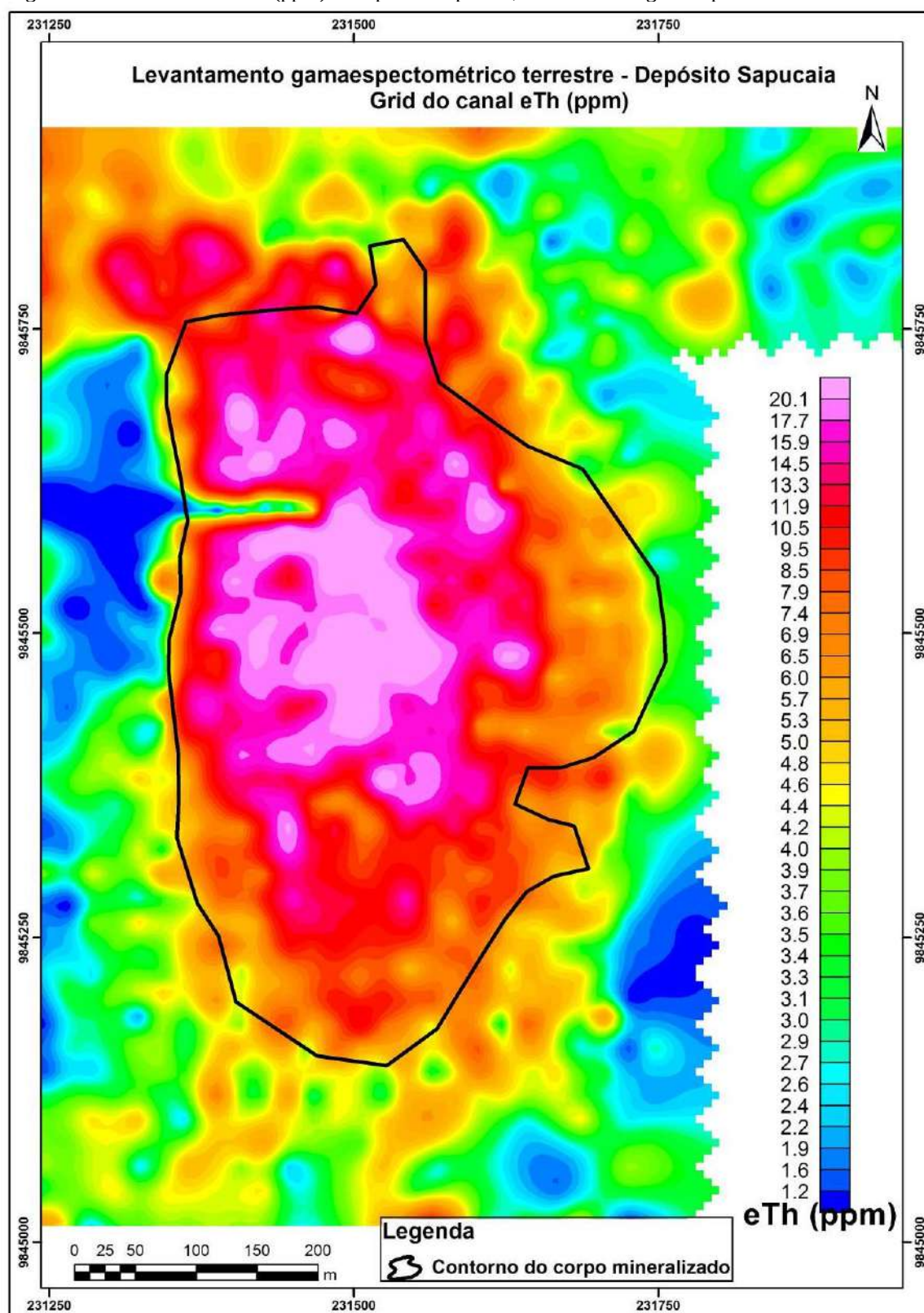
Fonte: O autor, 2019

Figura 22 – Grid do canal contagem total (ppm) - Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectrométrico terrestre



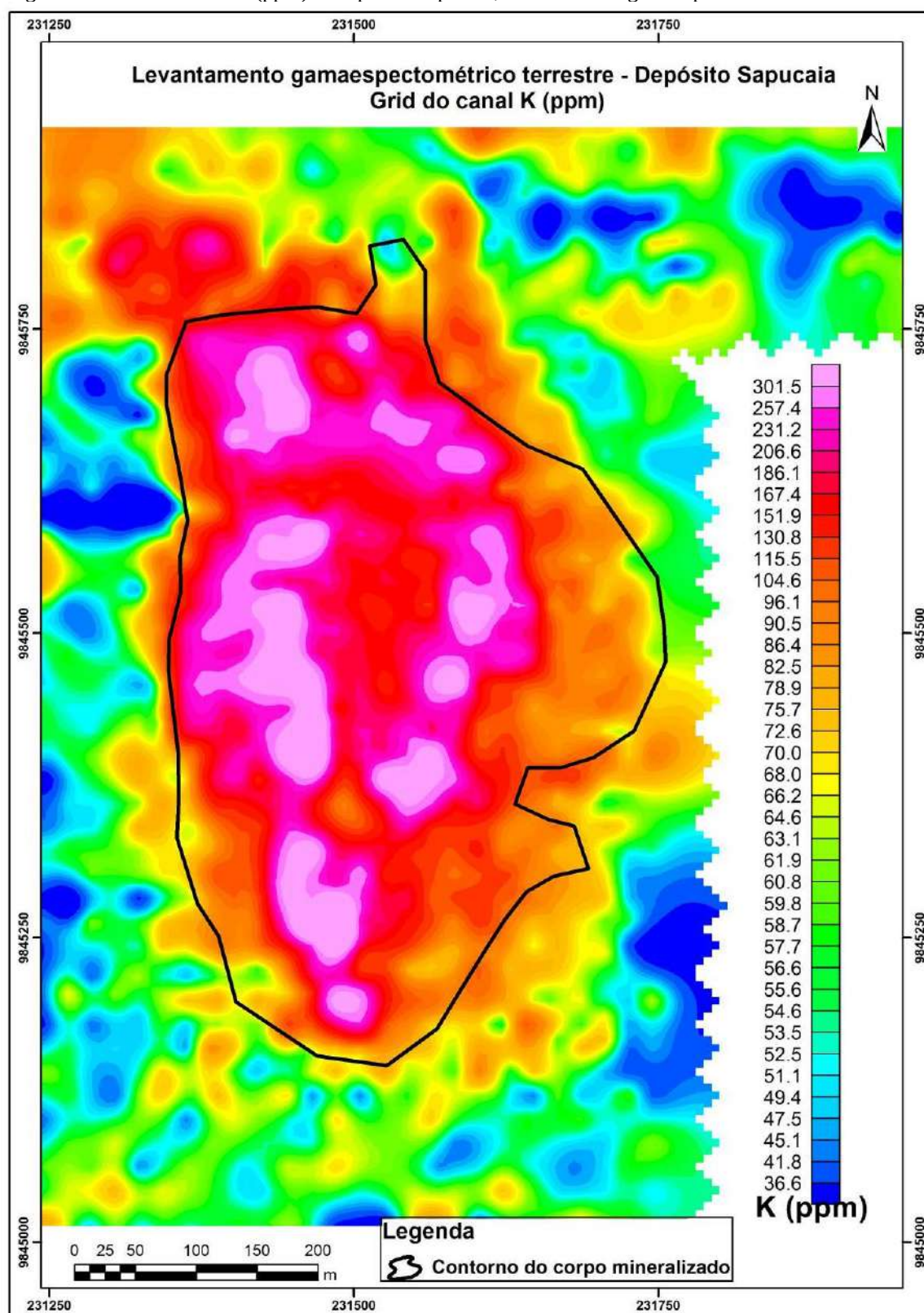
Fonte: O autor, 2019

Figura 23 - Grid do canal eTh (ppm) - Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectrométrico terrestre



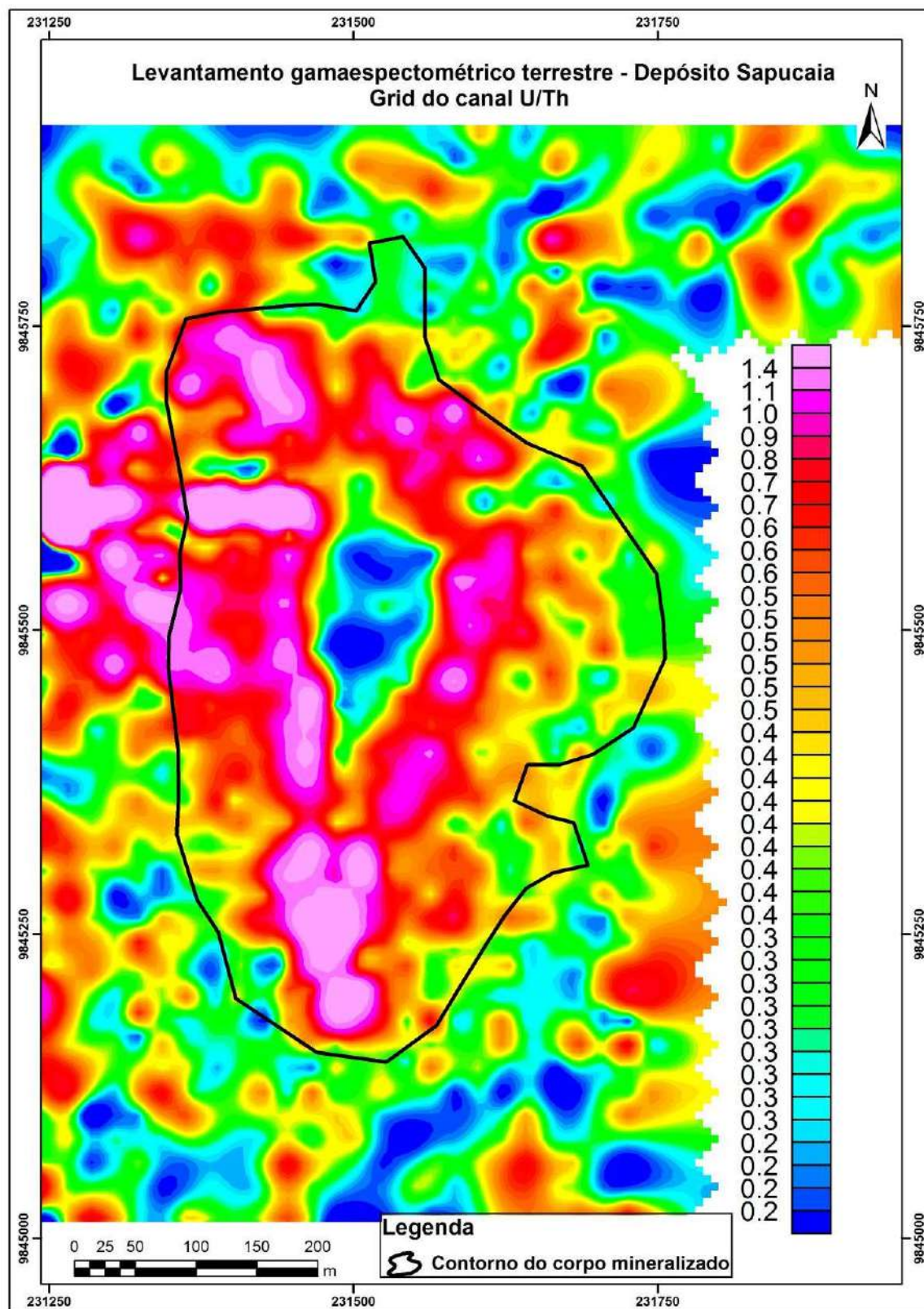
Fonte: O autor, 2019

Figura 24 - Grid do canal K (ppm) - Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectrométrico terrestre



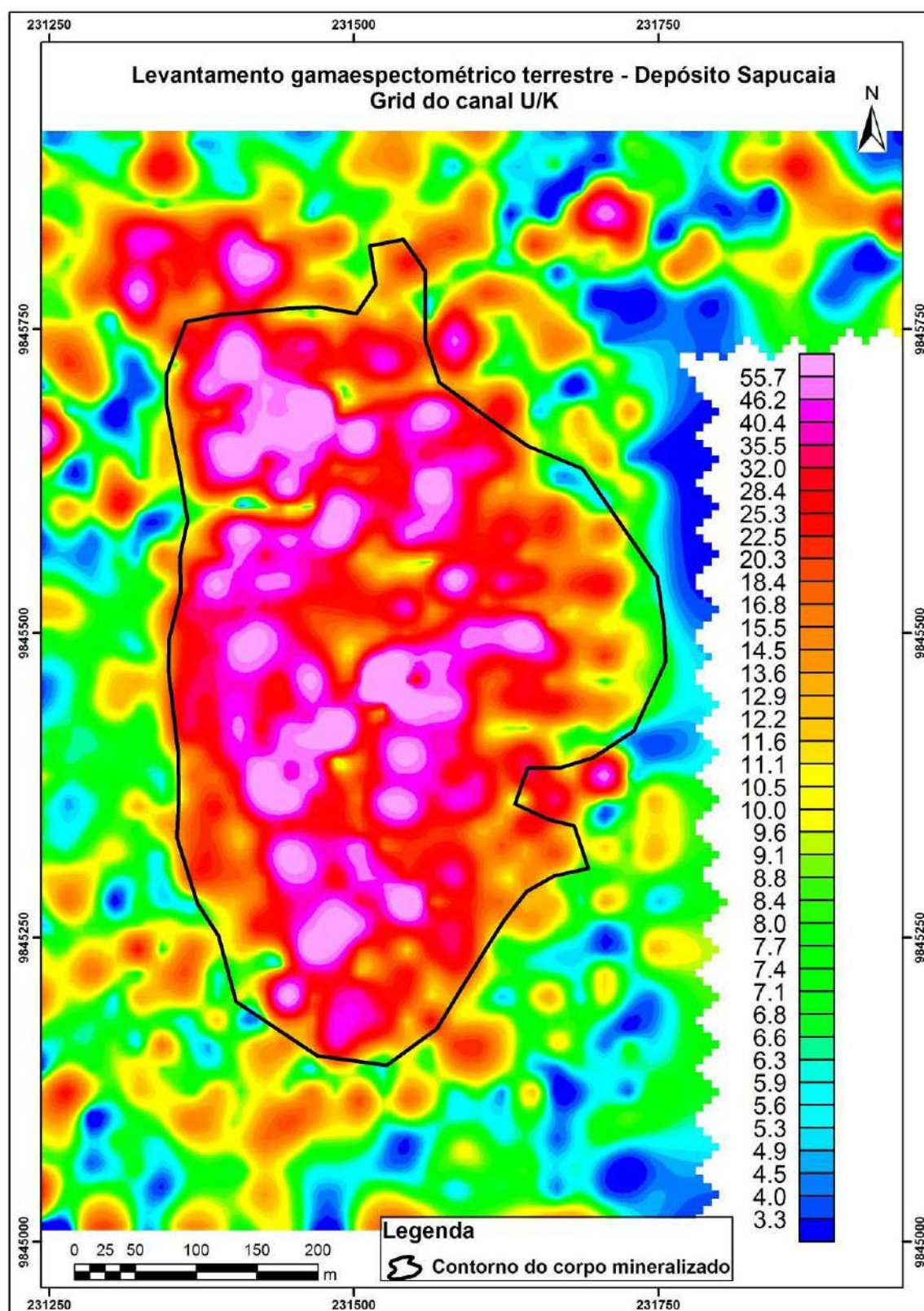
Fonte: O autor, 2019

Figura 25 - Grid do U/Th - Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectrométrico terrestre



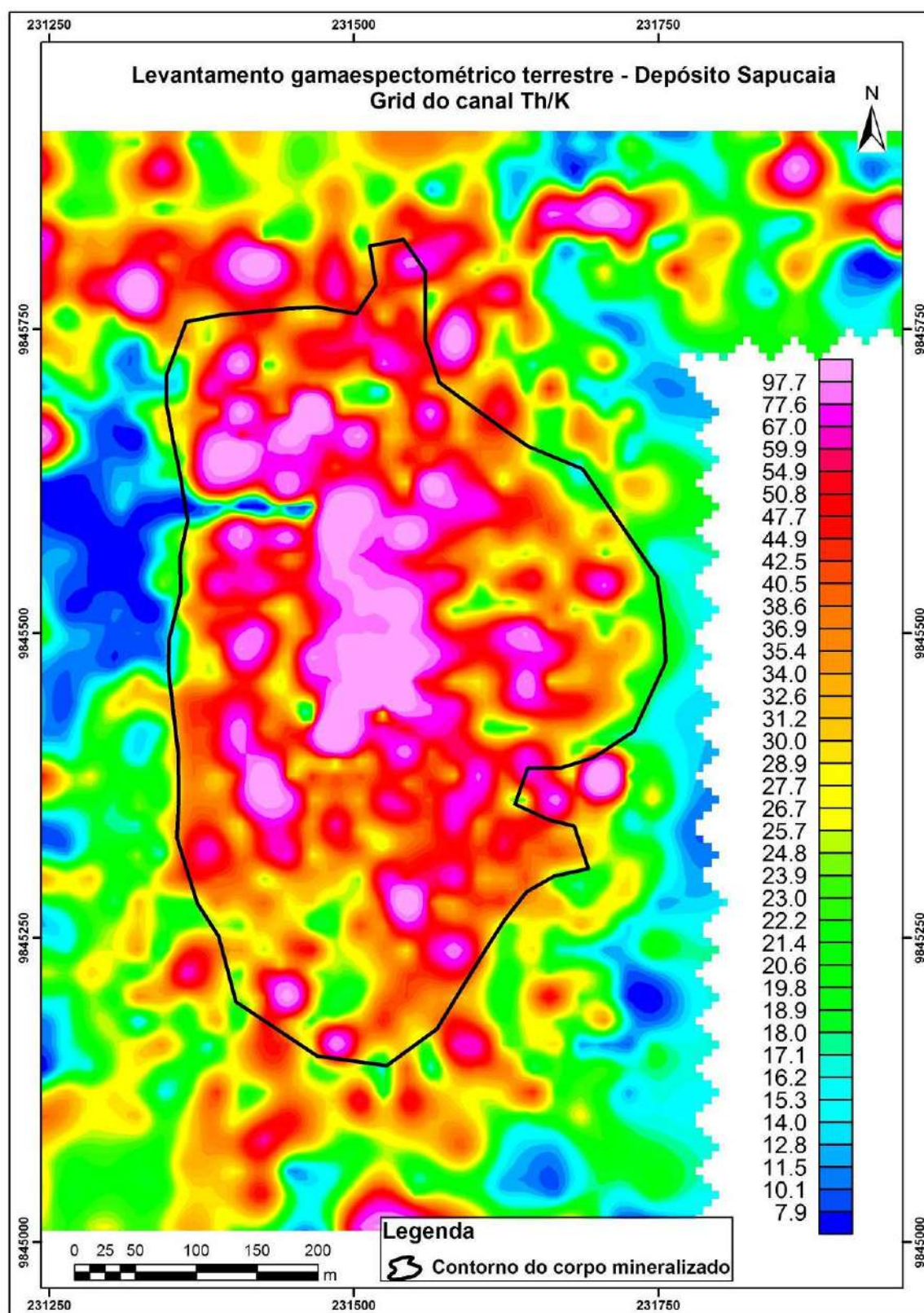
Fonte: O autor, 2019

Figura 26 - Grid do canal U/K - Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectrométrico terrestre



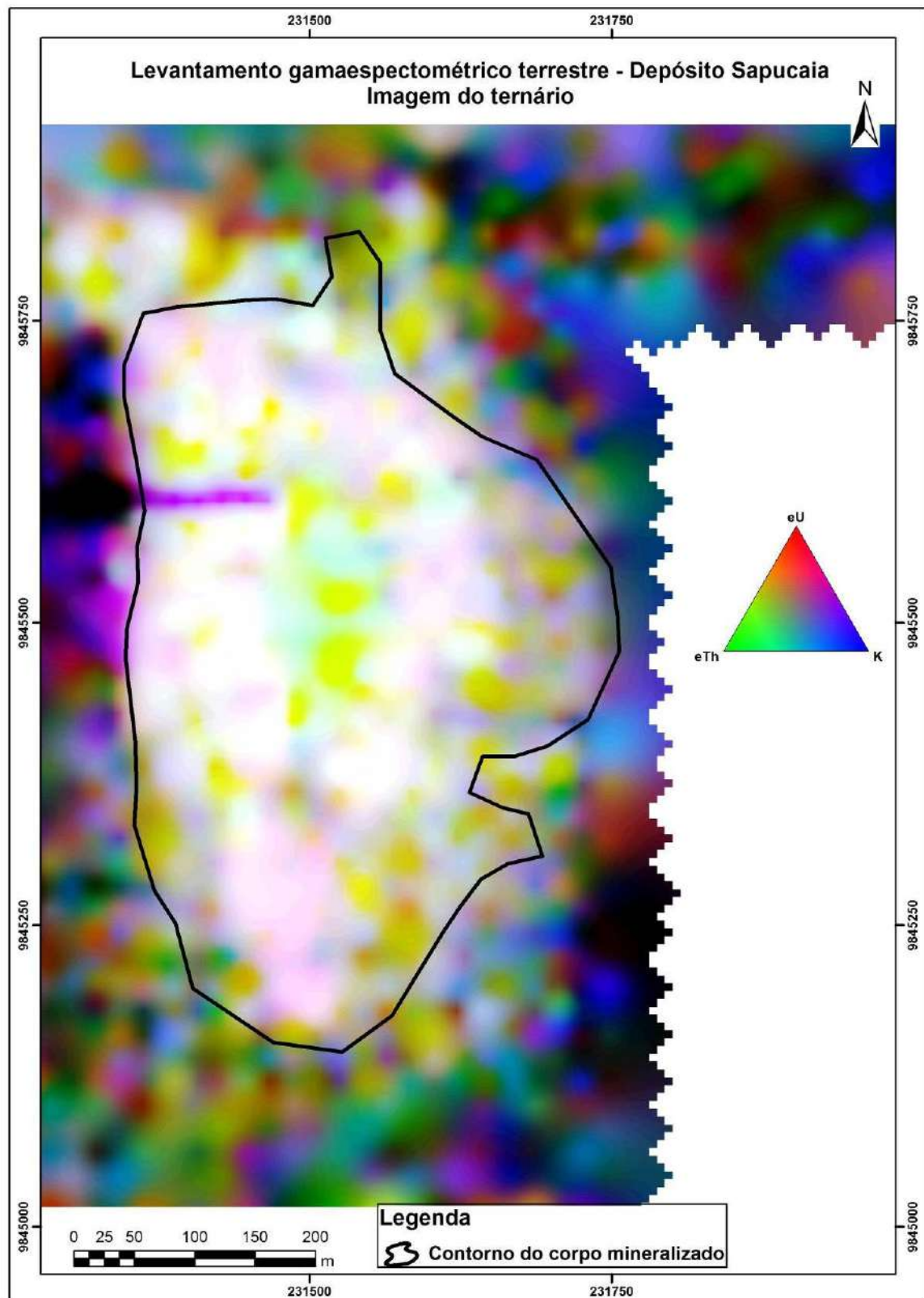
Fonte: O autor, 2019

Figura 27 - Grid do canal Th/K - Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectrométrico terrestre



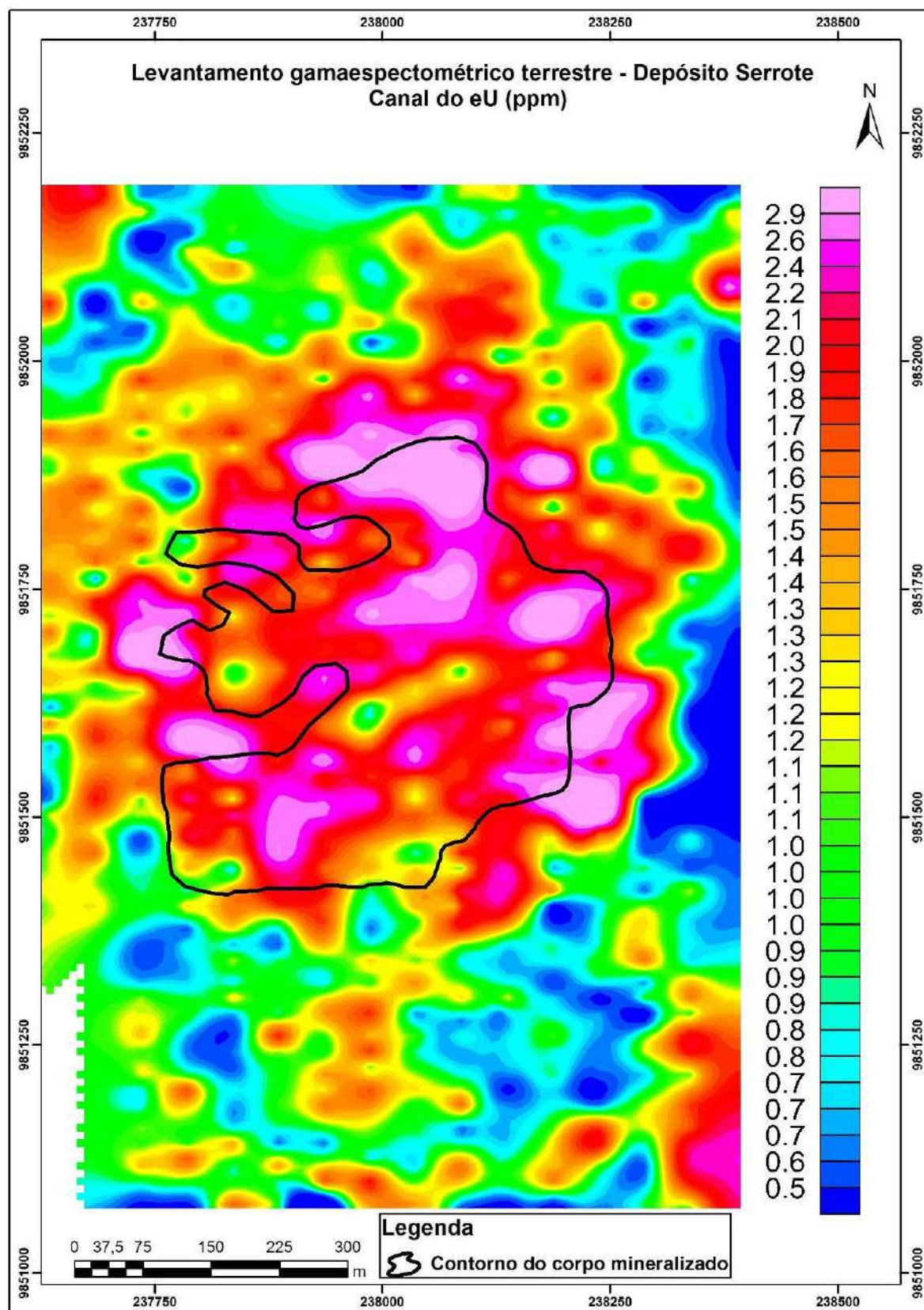
Fonte: O autor, 2019

Figura 28 - *Grid* da imagem ternário – Depósito Sapucaia, levantamento gamaespectométrico terrestre



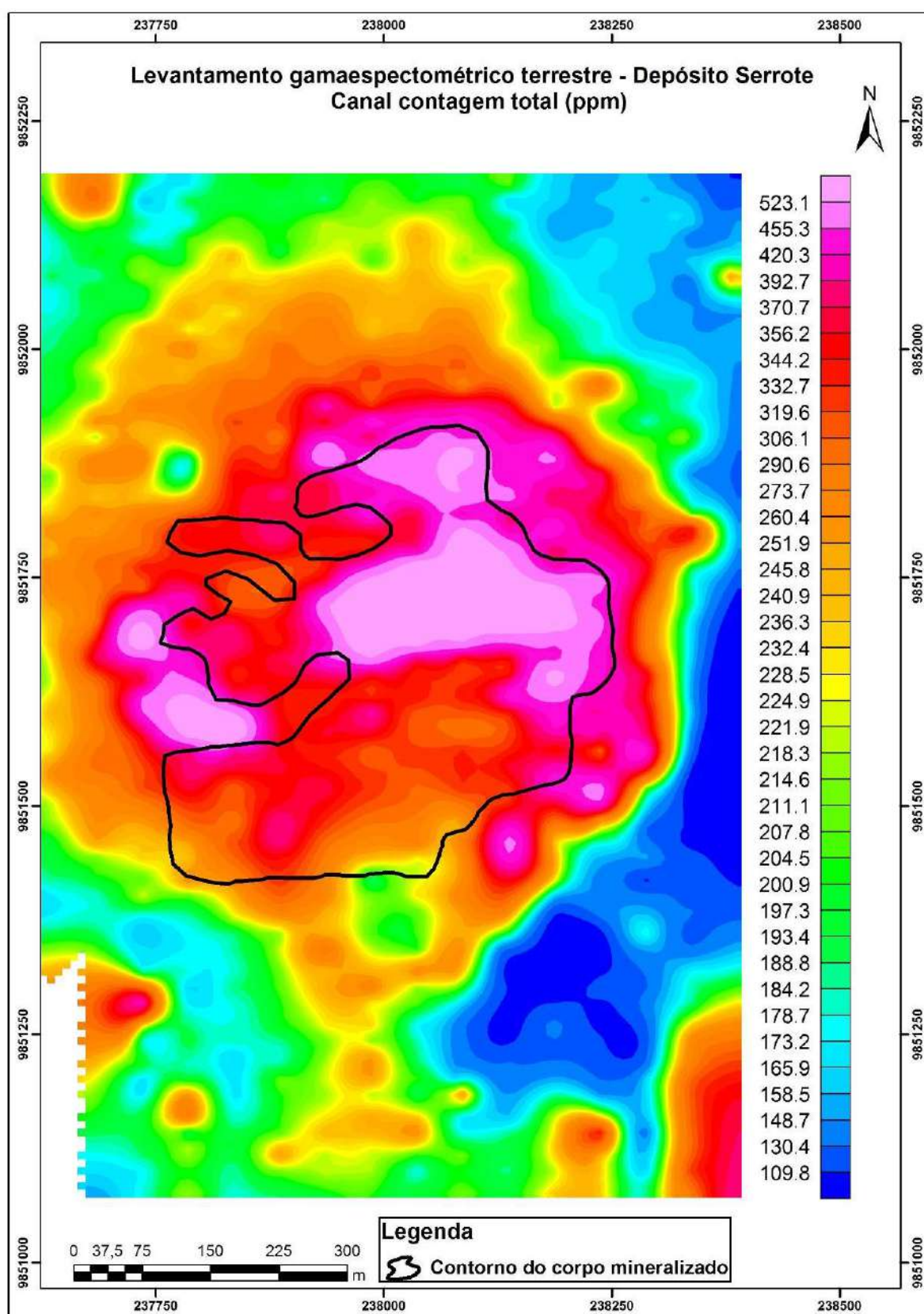
Fonte: O autor, 2019

Figura 29 - Grid do canal eU (ppm) - Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre



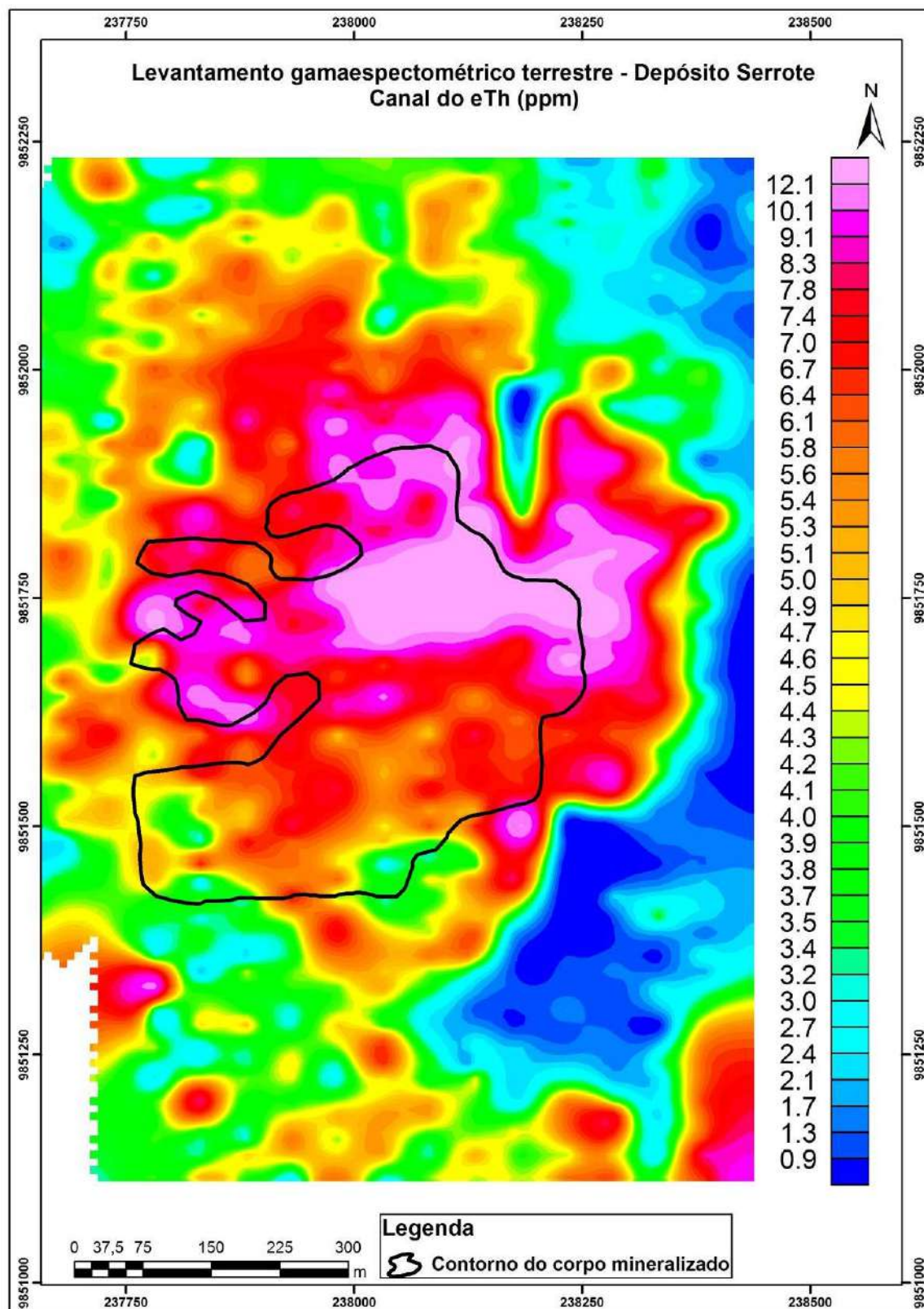
Fonte: O autor, 2019

Figura 30 - Grid do canal contagem total (ppm) – Depósito Serrote, levantamento gamaespectrométrico terrestre.



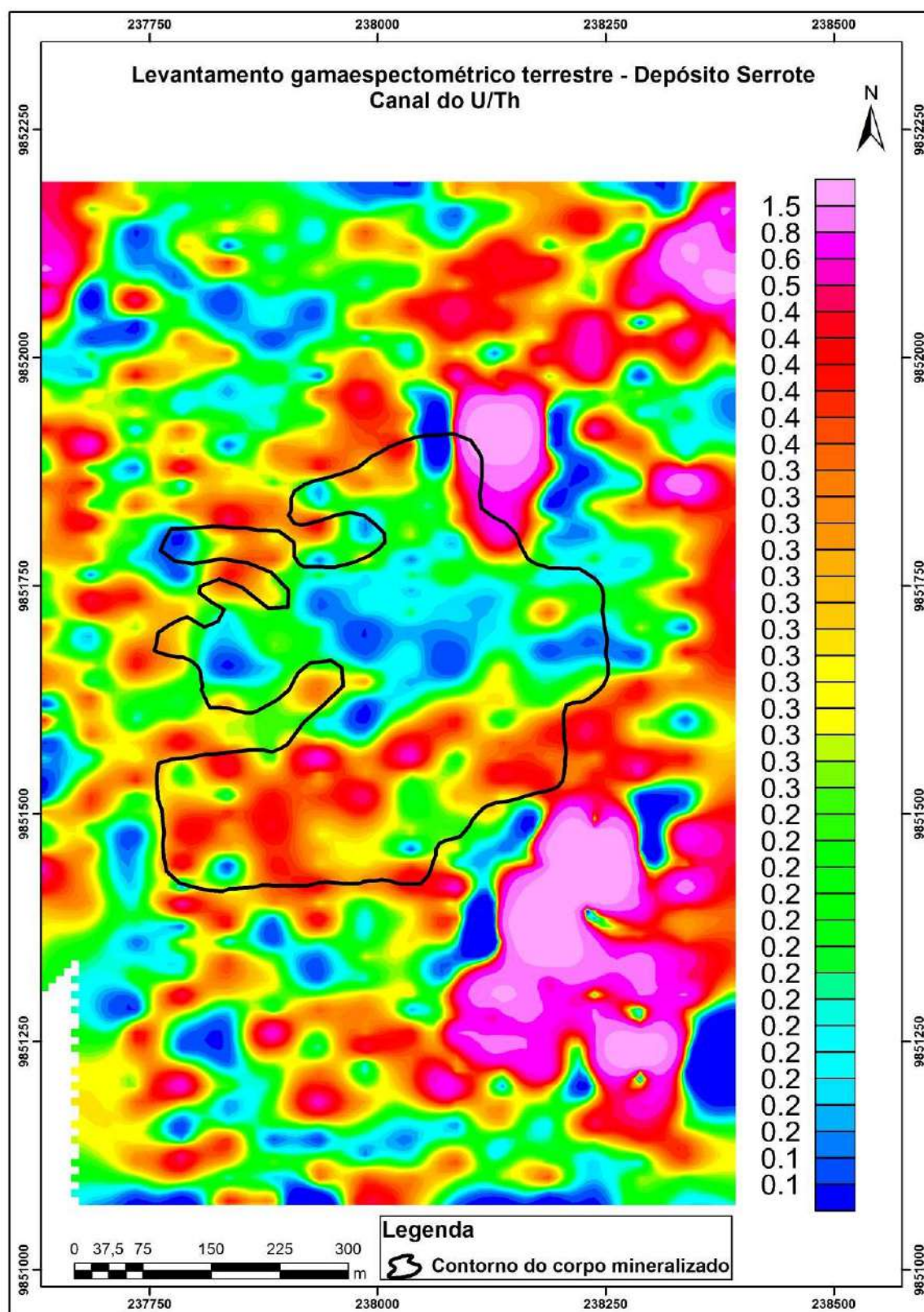
Fonte: O autor, 2019

Figura 31 - Grid do canal eTh (ppm) – Depósito Serrote, levantamento gamaespectrométrico terrestre



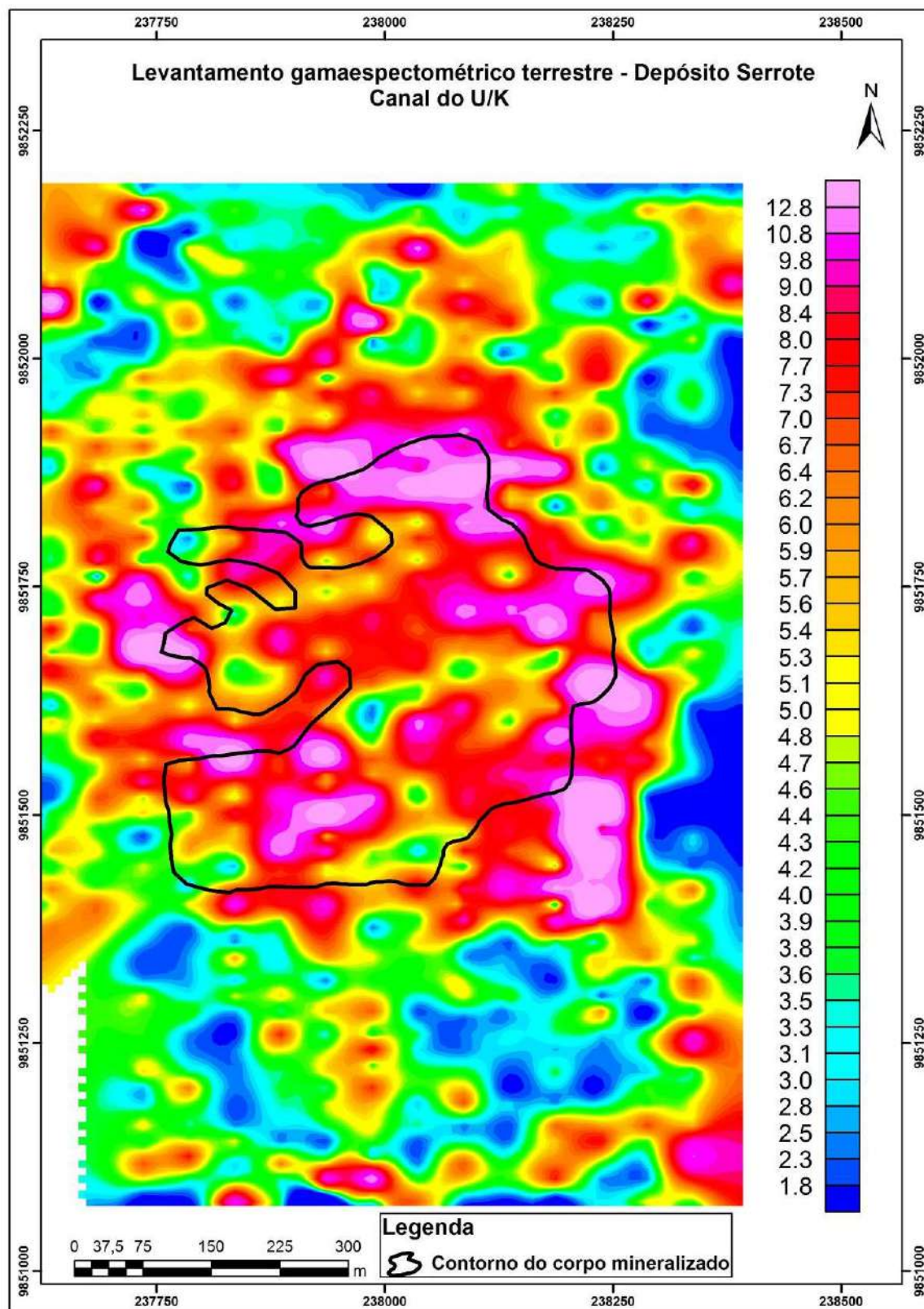
Fonte: O autor, 2019

Figura 33 - Grid do canal U/Th – Depósito Serrote, levantamento gamaespectrométrico terrestre



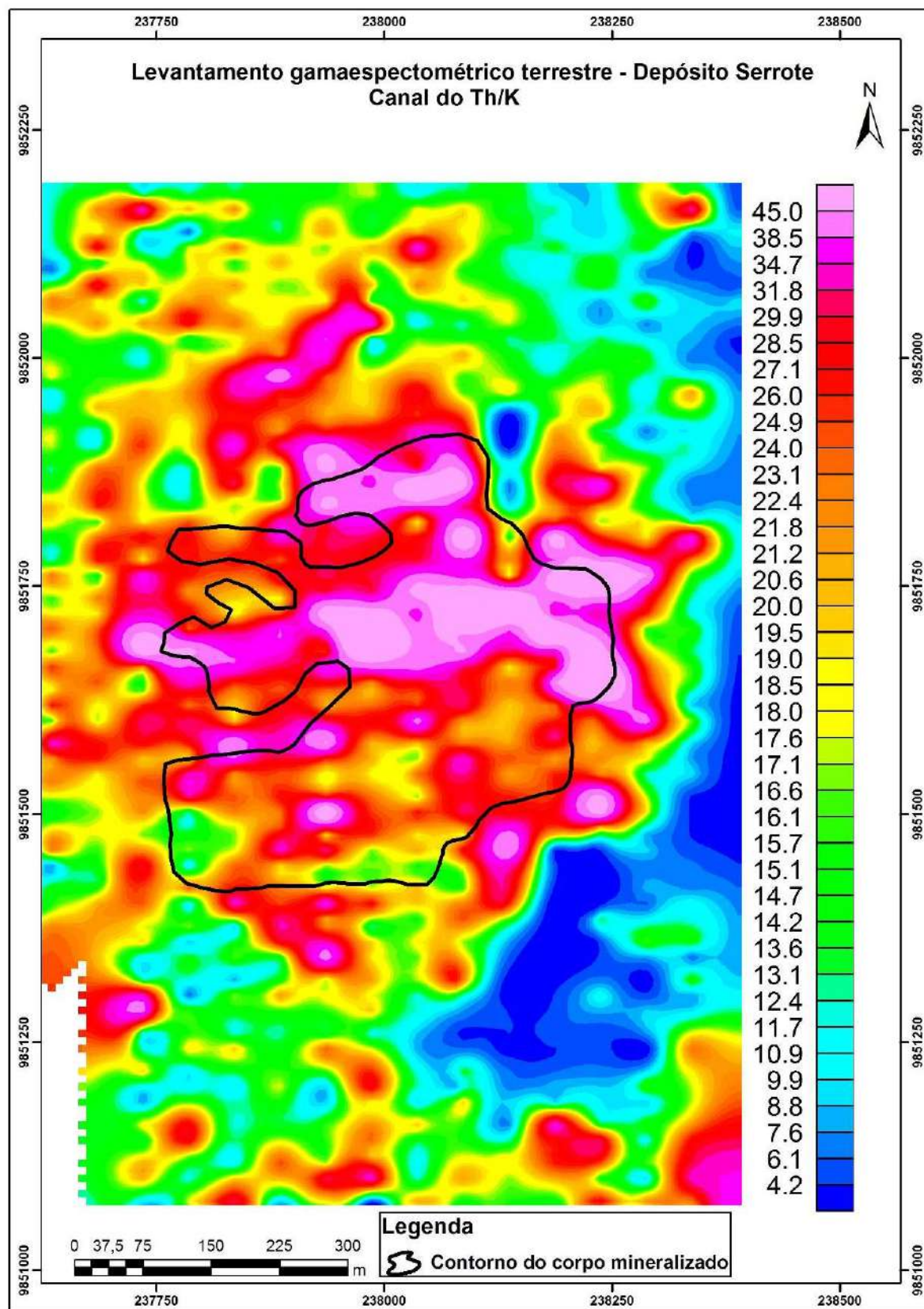
Fonte: O autor, 2019

Figura 34 - Grid do canal U/K – Depósito Serrote, levantamento gamaespectrométrico terrestre



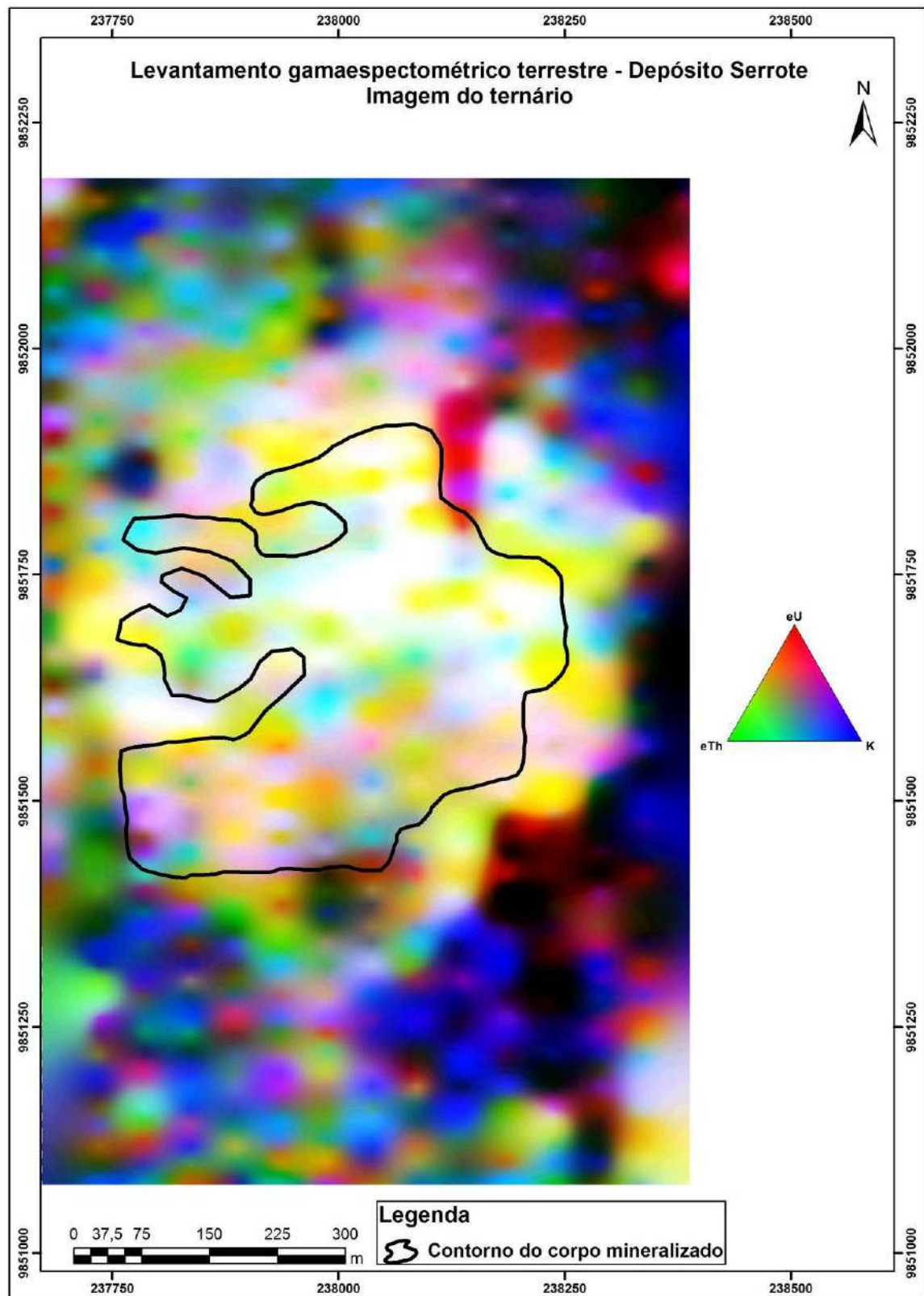
Fonte: O autor, 2019

Figura 35 - Grid do canal Th/K – Depósito Serrote, levantamento gamaespectométrico terrestre



Fonte: O autor, 2019

Figura 36 - Grid da imagem ternário - Depósito Serrote, levantamento gamaespectrométrico terrestre



Fonte: O autor, 2019

5.1.2 Análise estatística dos depósitos de Sapucaia e Serrote

Conforme metodologia descrita no item 4.1.5, segue as tabelas com os valores máximo, mínimo e média dos radioelementos para os dois depósitos.

Tabela 1 - Estatística dos valores dos radioelementos para o Depósito Sapucaia

Depósito Sapucaia	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Ct (ppm)	U/Th	U/K	Th/k	Tendência de concentração na imagem do ternário
Mínimo	1,40	3,90	0,01	204,70	0,20	8,80	23,90	eU, eTh, K. Com concentrações localizadas de eU/eTh
Máximo	16,20	20,10	0,03	1472,40	1,40	55,70	97,70	
Média	8,80	12,00	0,02	838,55	0,80	32,25	60,80	

Fonte: O autor, 2019

Tabela 2 - Estatística dos valores dos radioelementos para o Depósito Serrote

Depósito Serrote	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Ct (ppm)	U/Th	U/K	Th/k	Tendência de concentração na imagem do ternário
Mínimo	0,90	3,50	0,20	200,90	0,10	3,50	13,60	eU, eTh, K. Com concentrações localizadas de eU/eTh
Máximo	2,90	12,10	0,40	523,10	0,80	12,80	45,00	
Média	8,80	7,80	0,30	362,00	0,45	8,15	29,30	

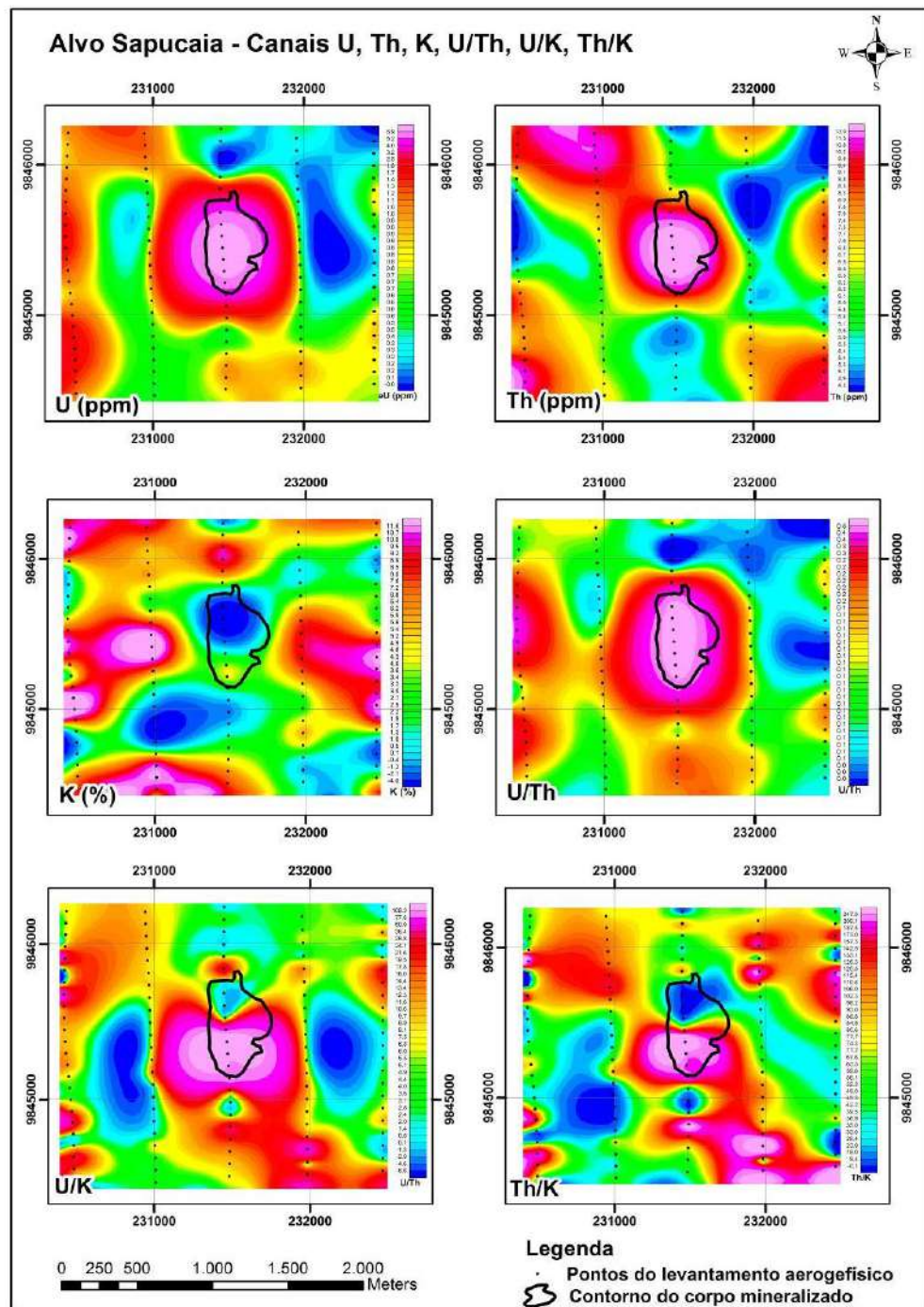
Fonte: O autor, 2019

5.2 Aerogamaespectrometria

5.2.1 Análise do levantamento sobre os alvos de pesquisa – Laterita Fosfática

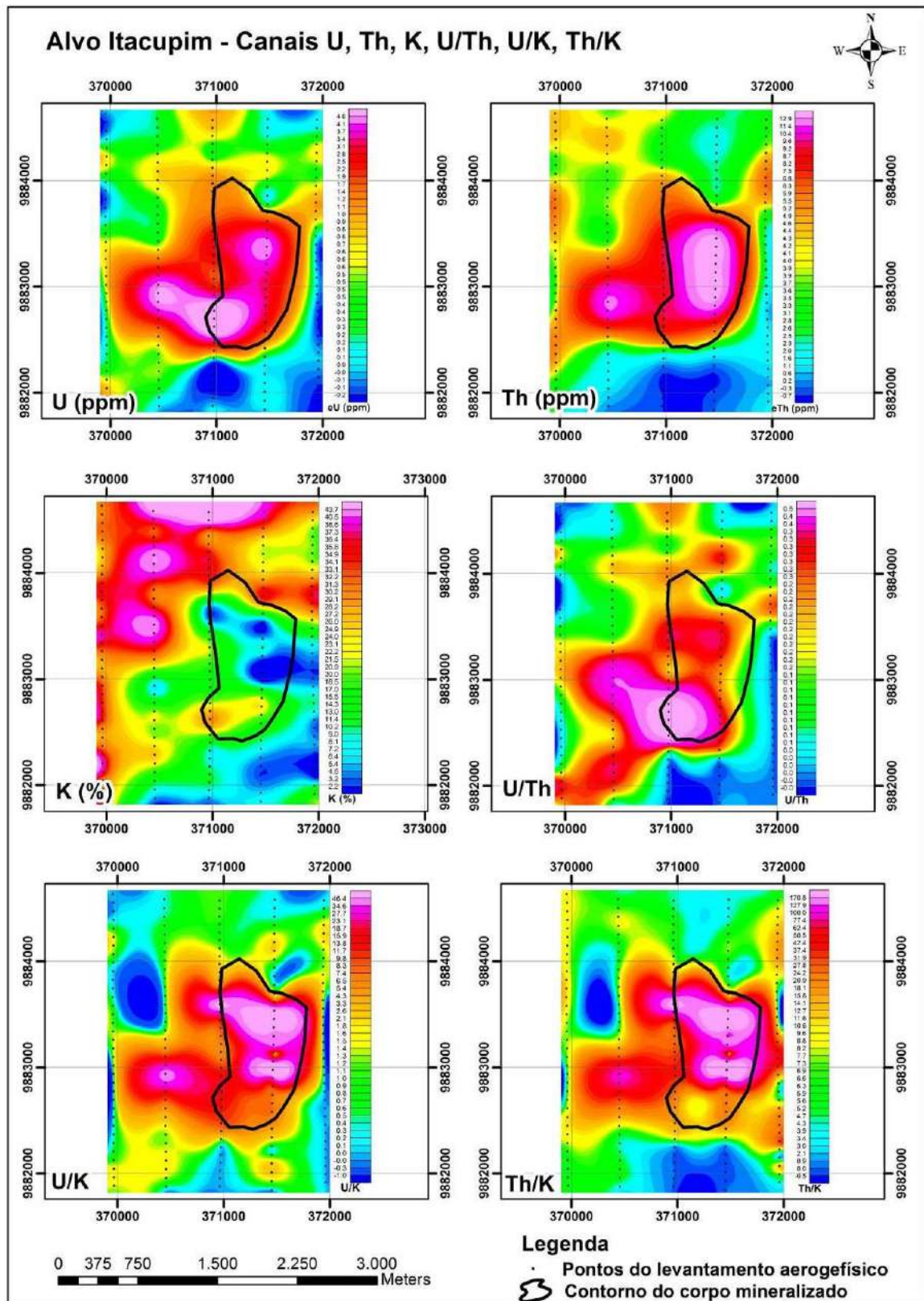
As Figuras 37 a 47 apresentam os grids gerados para cada alvo, sendo que os mapas do ternário e do canal Ct (Contagem total) apresentam os alvos unificados, facilitando a visualização.

Figura 37 - Grids dos radioelementos para o Alvo Sapucaia



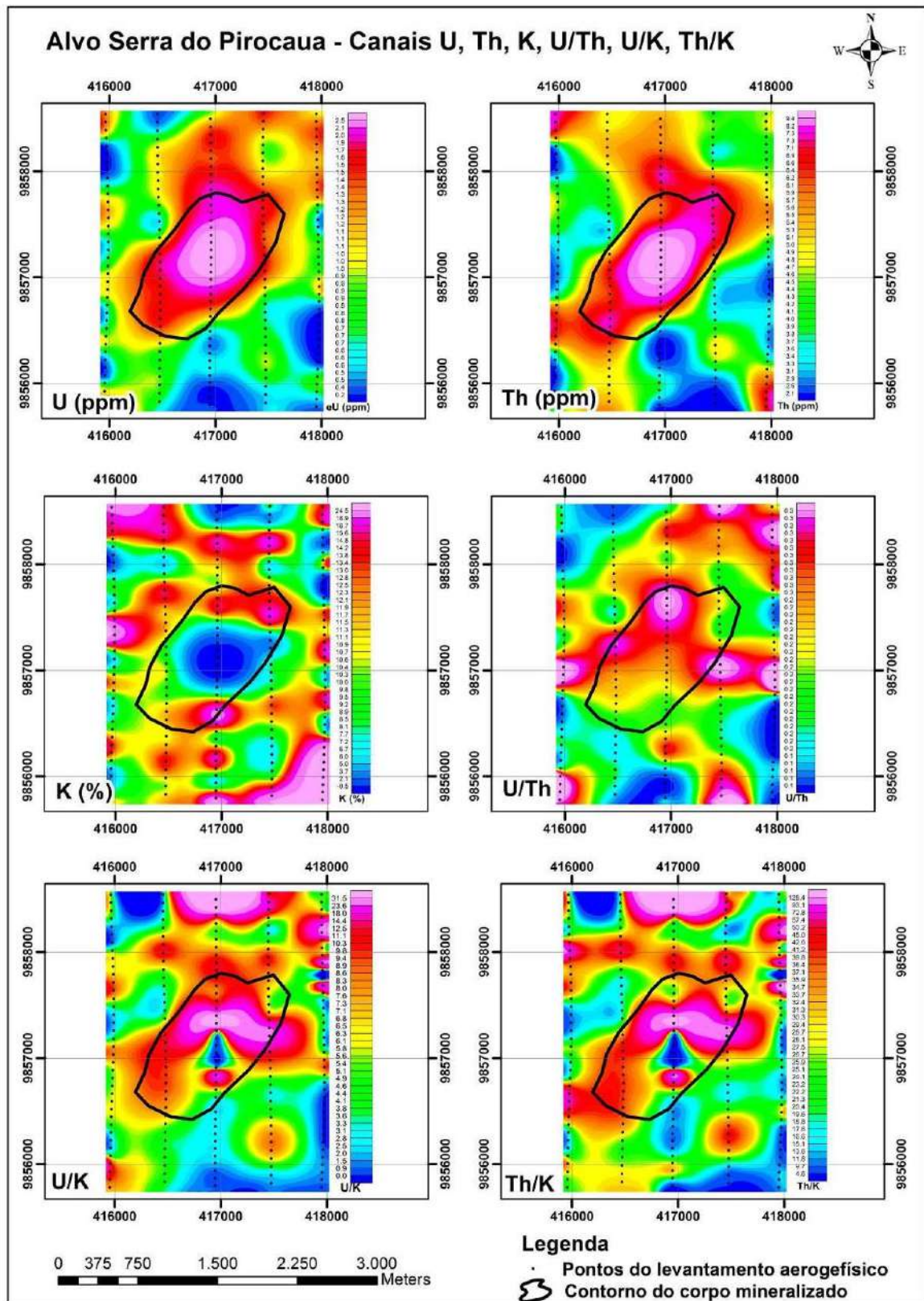
Fonte: O autor, 2019

Figura 38 - *Grids* dos radioelementos para o Alvo Itacupim



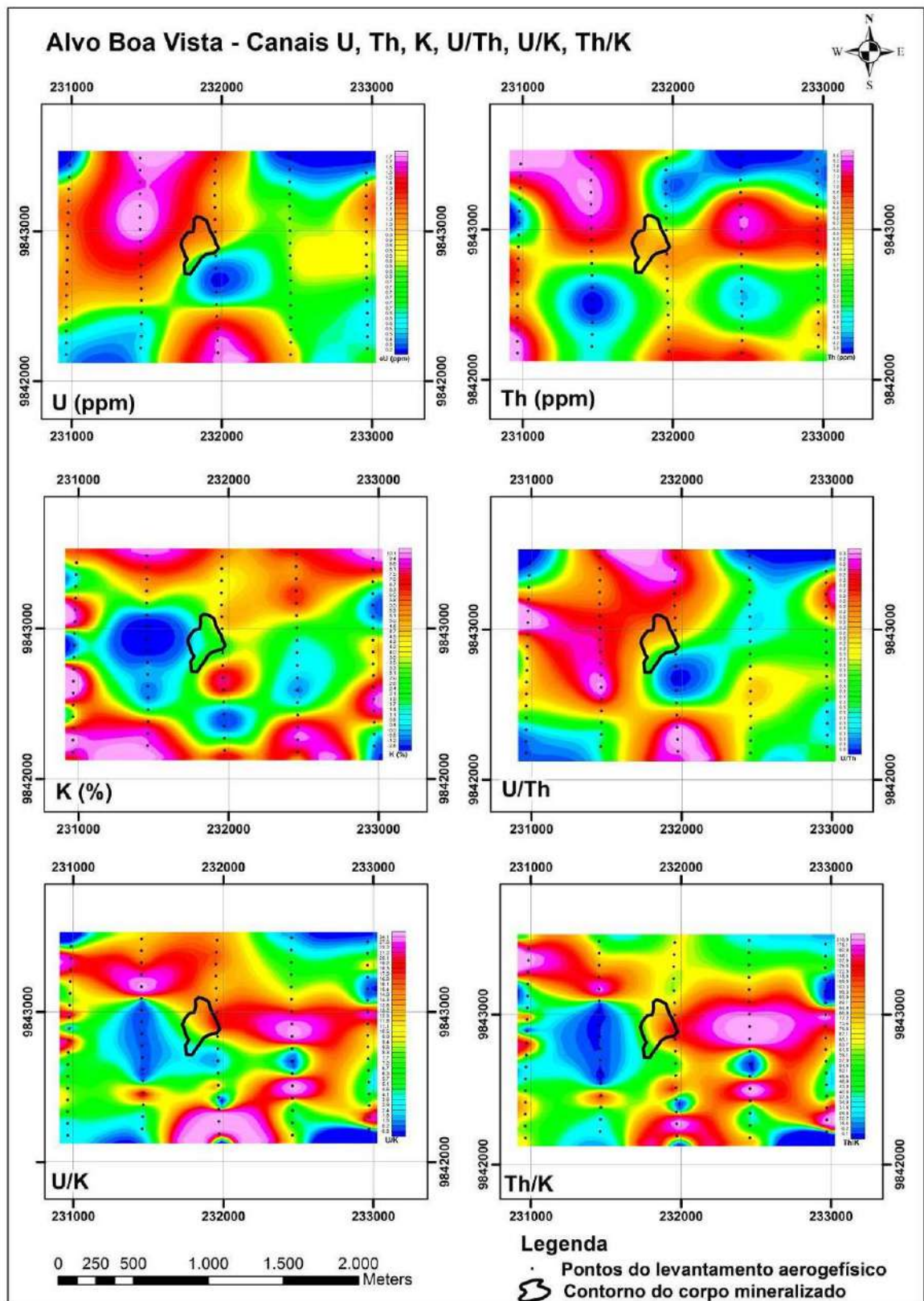
Fonte: O autor, 2019

Figura 39 - Grids dos radioelementos para o Alvo Serra do Pirocaua



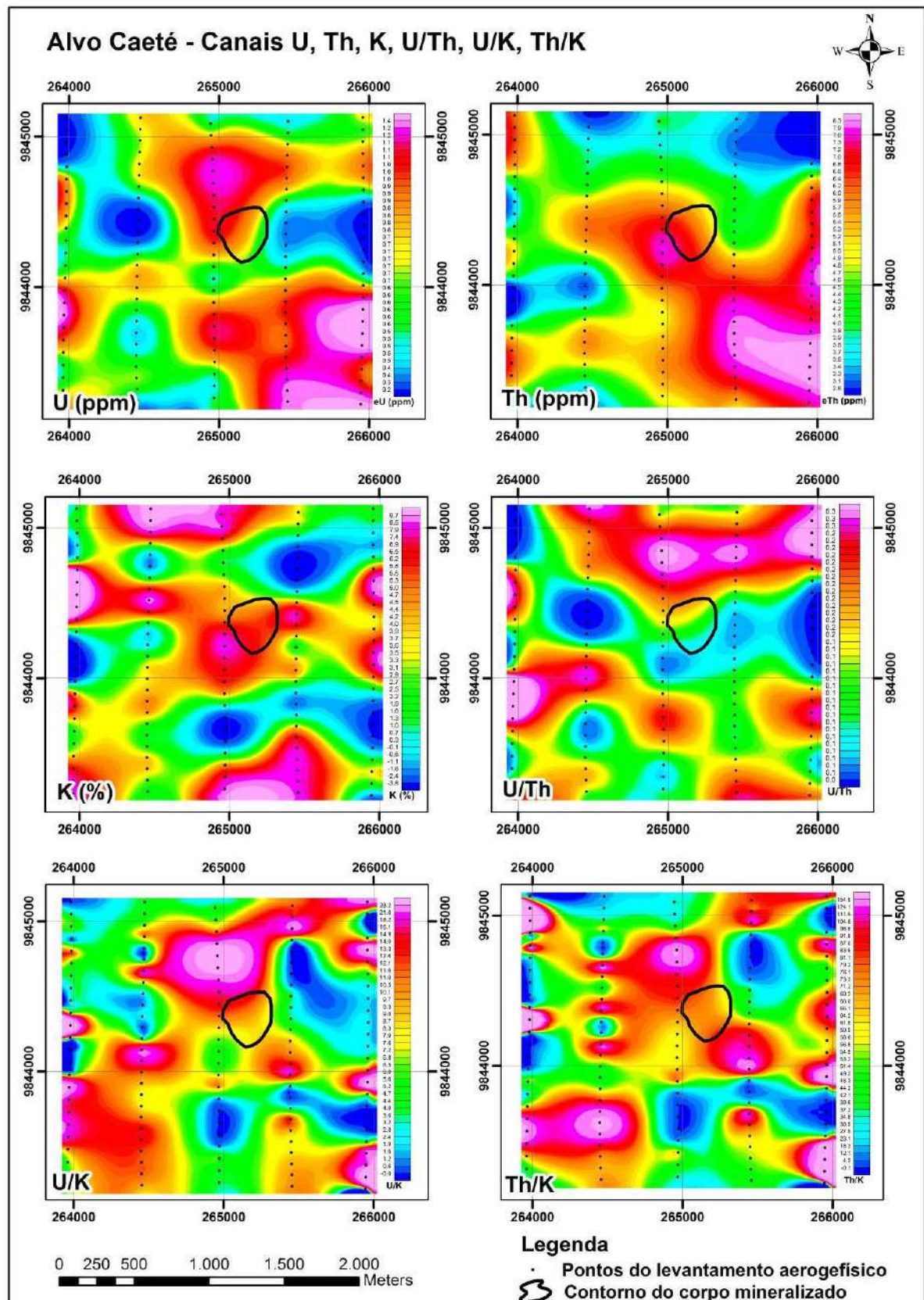
Fonte: O autor, 2019

Figura 40 - Grids dos radioelementos para o Alvo Boa Vista



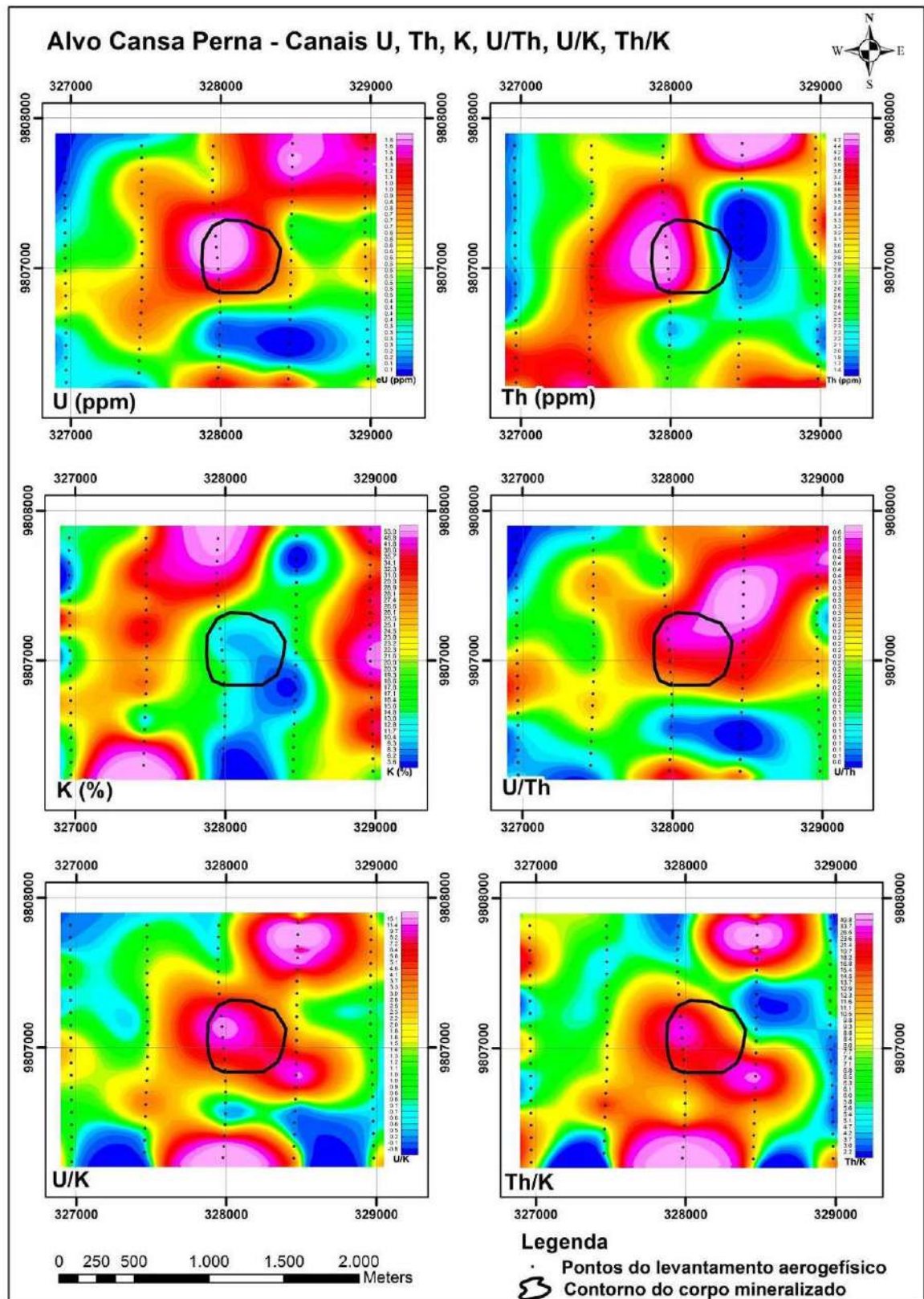
Fonte: O autor, 2019

Figura 41 - Grids dos radioelementos para o Alvo Caeté



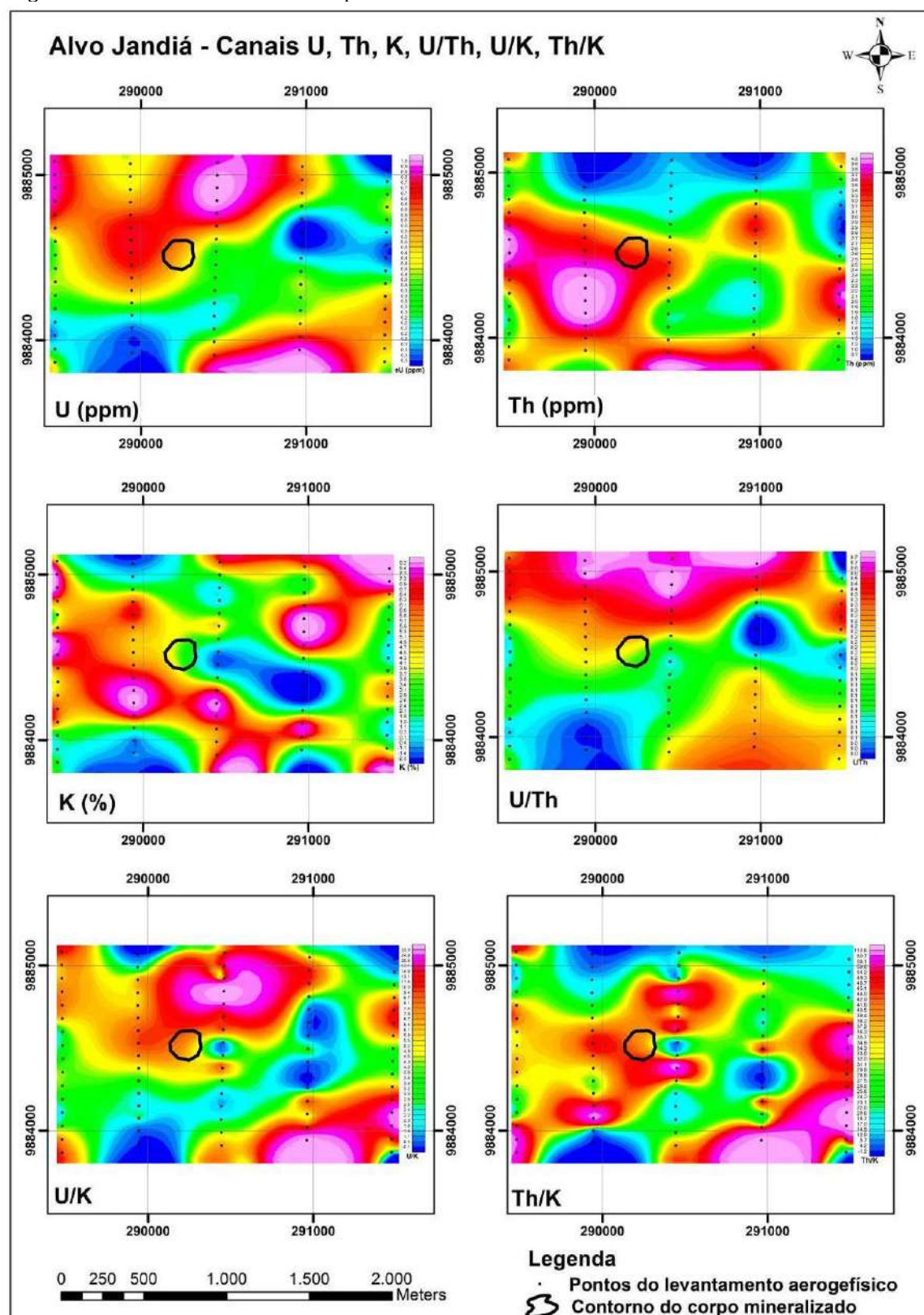
Fonte: O autor, 2019

Figura 42 - Grids dos radioelementos para o Alvo Cansa Perna



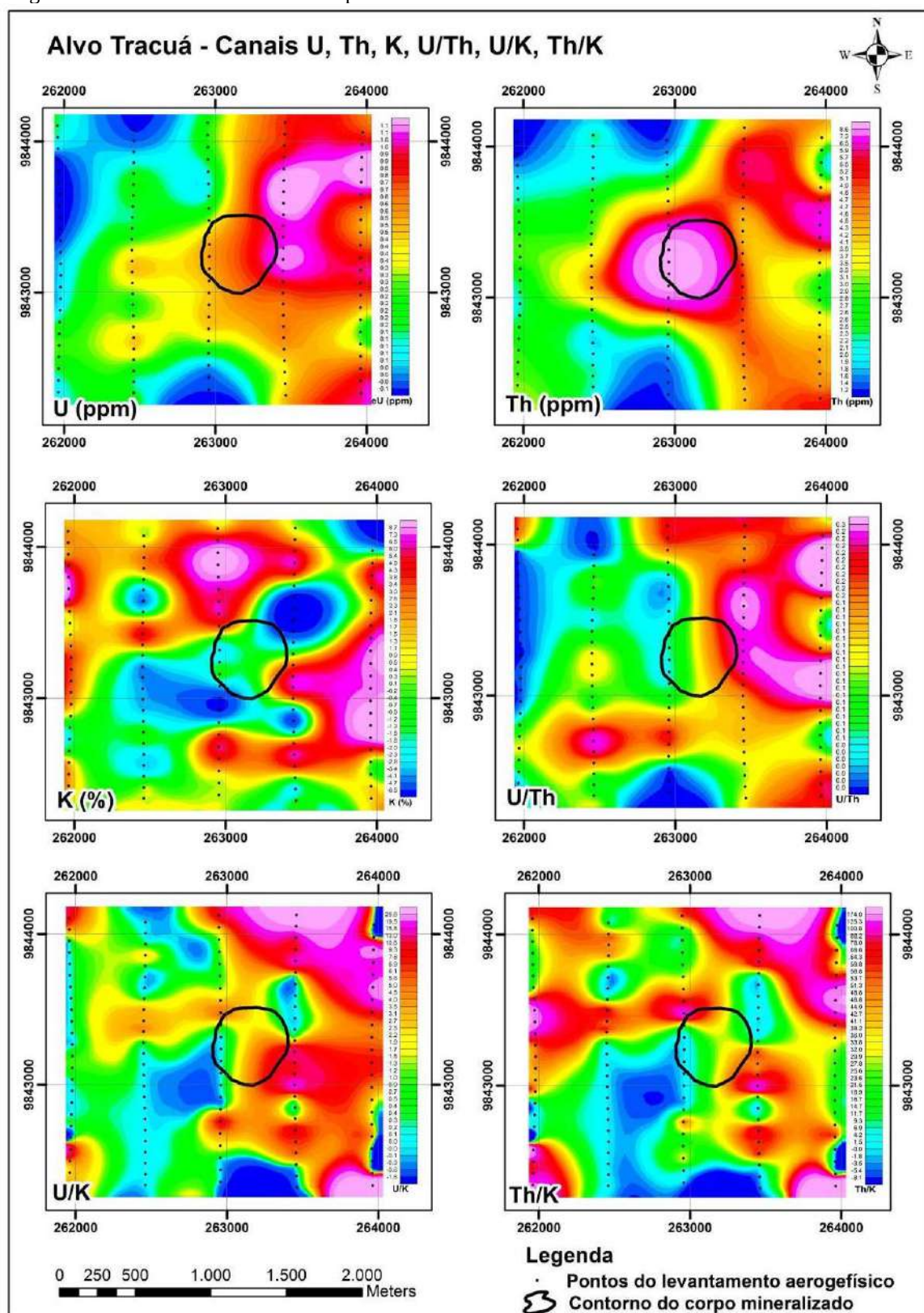
Fonte: O autor, 2019

Figura 43 - Grids dos radioelementos para o Alvo Jandiá



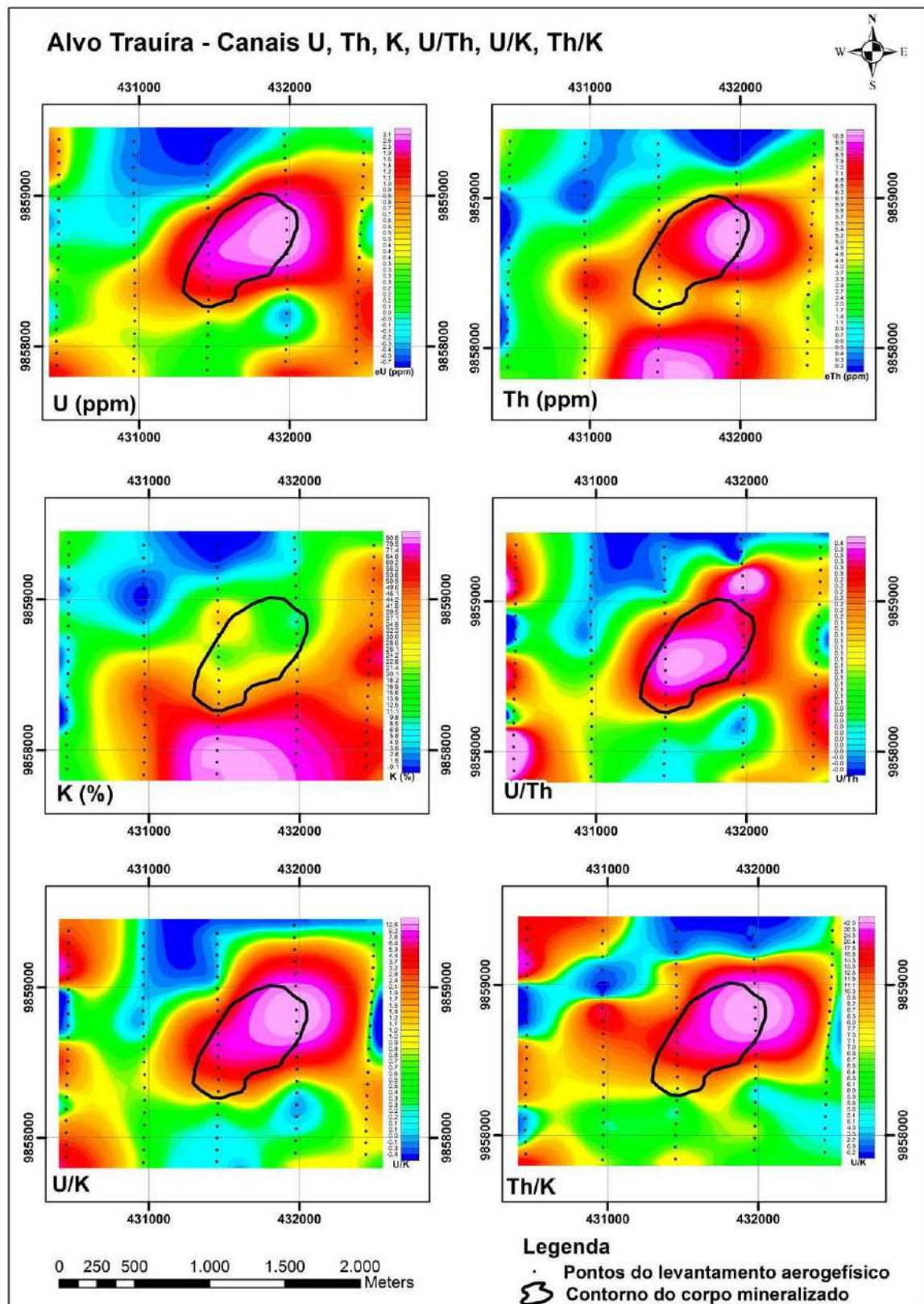
Fonte: O autor, 2019

Figura 44 - Grids dos radioelementos para o Alvo Tracuá



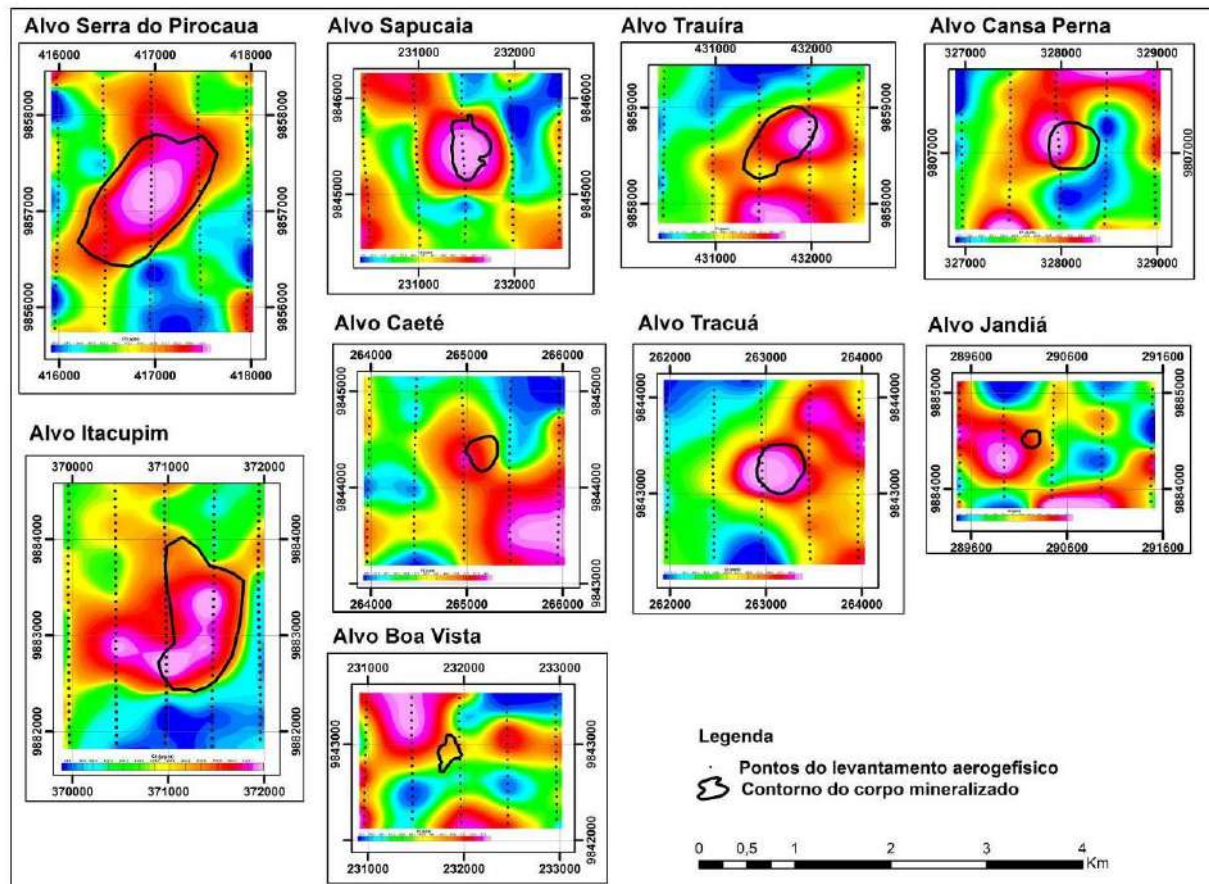
Fonte: O autor, 2019

Figura 45 - Grids dos radioelementos para o Alvo Trauíra



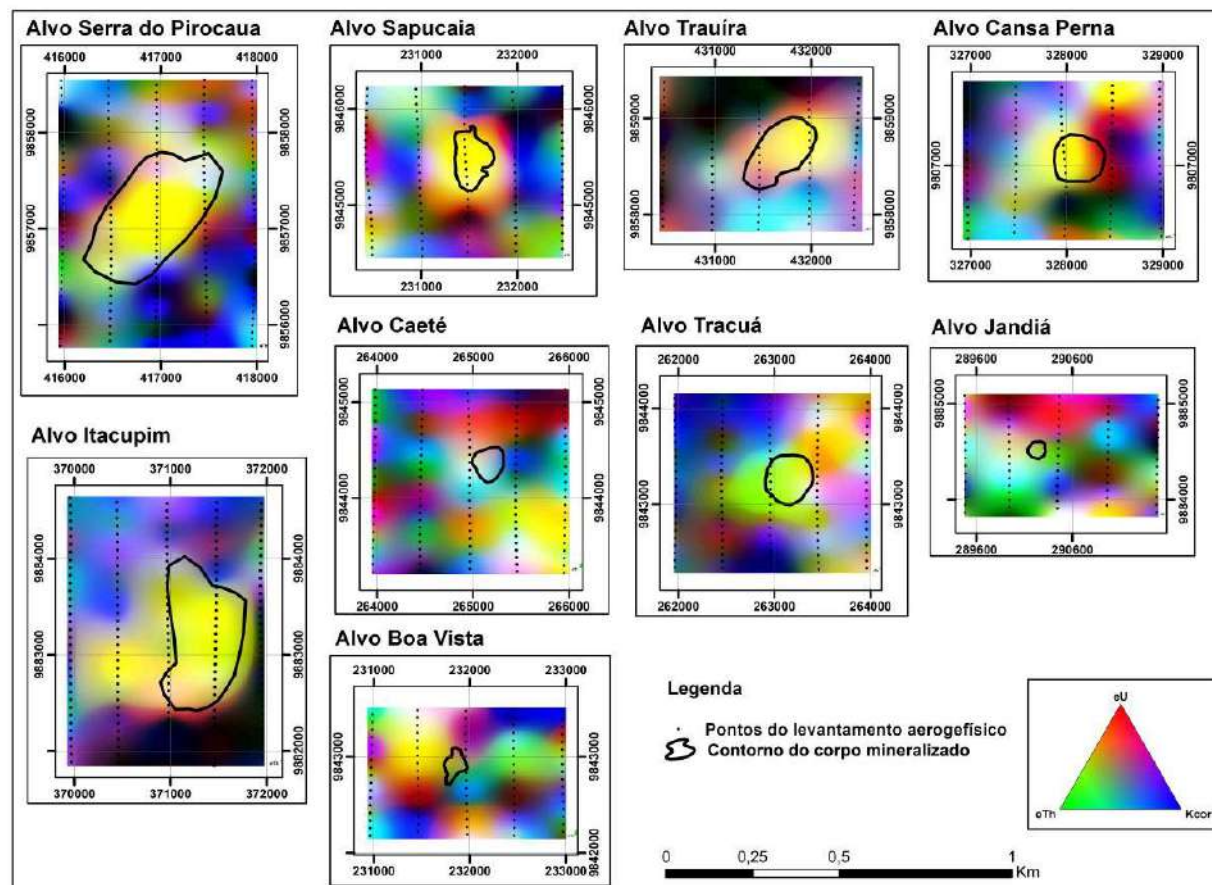
Fonte: O autor, 2019

Figura 46 – *Grids* do canal contagem total (ppm) para todos os alvos relativos a pesquisa: Serra do Pirocaua, Sapucaia, Trauíra, Cansa Perna, Itacupim, Caeté, Tracuá, Jandiá e Boa Vista



Fonte: O autor, 2019

Figura 47 - *Grids* do canal contagem total (ppm) para todos os alvos relativos a pesquisa: Serra do Pirocaua, Sapucaia, Trauíra, Cansa Perna, Itacupim, Caeté, Tracuá, Jandiá e Boa Vista

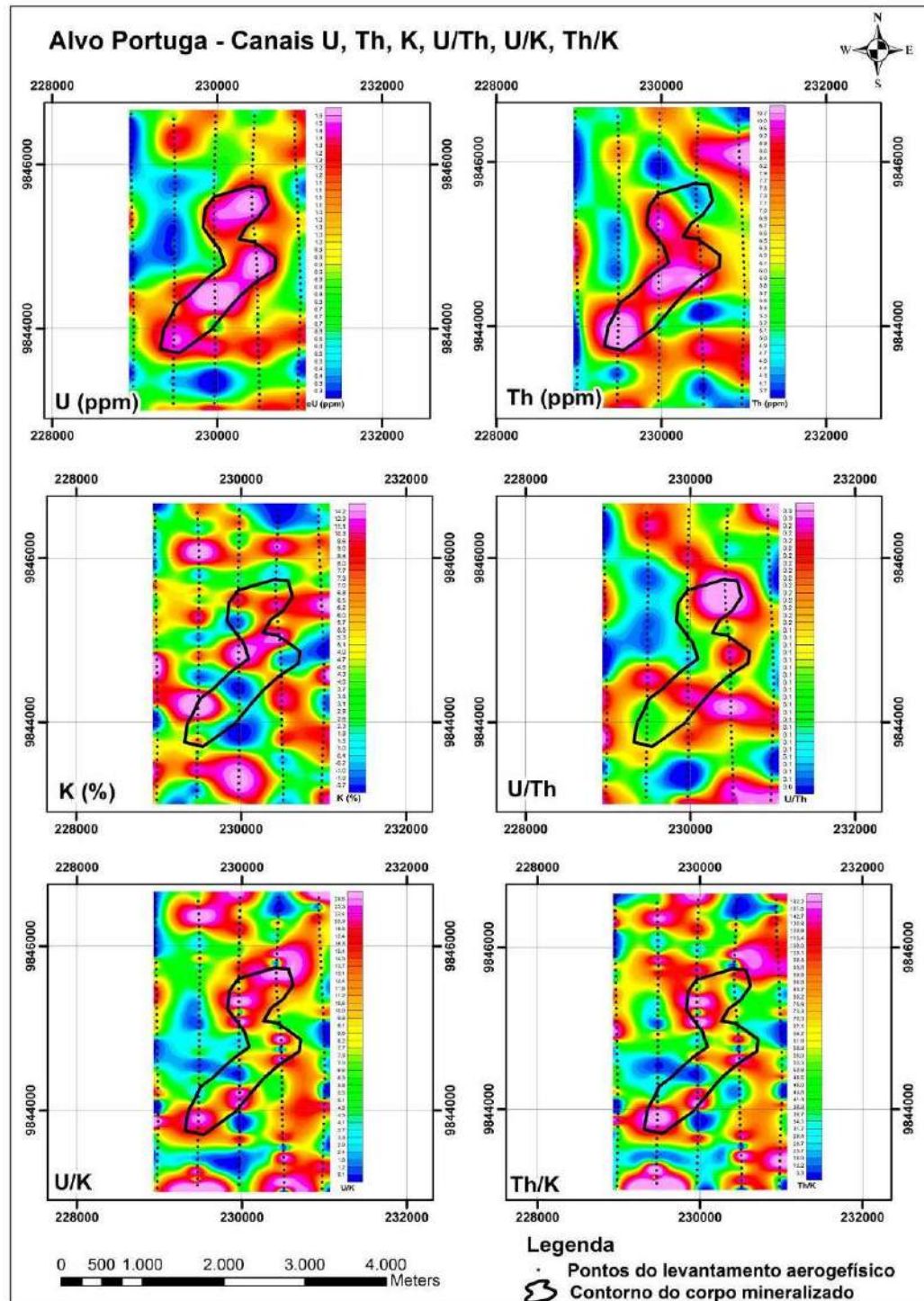


Fonte: O autor, 2019

5.2.2 Análise do levantamento sobre os alvos de pesquisa – Laterita Ferruginosa

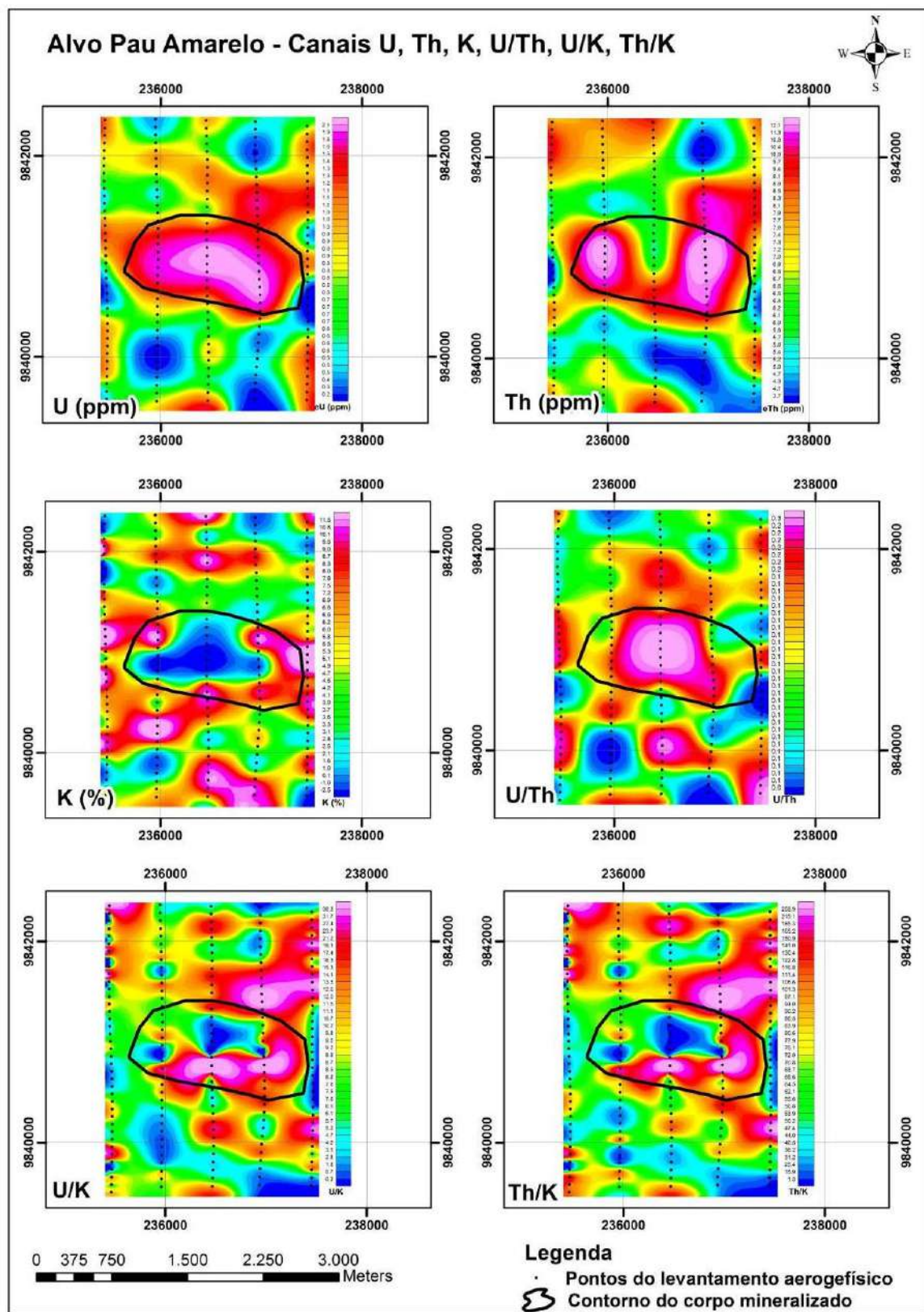
As Figuras 48 a 50 apresentam os grids gerados para cada alvo, sendo que os mapas do ternário e do canal Ct (Contagem total) apresentam os alvos unificados, facilitando a visualização.

Figura 48 - Grids dos rádio elementos para o Alvo Portuga



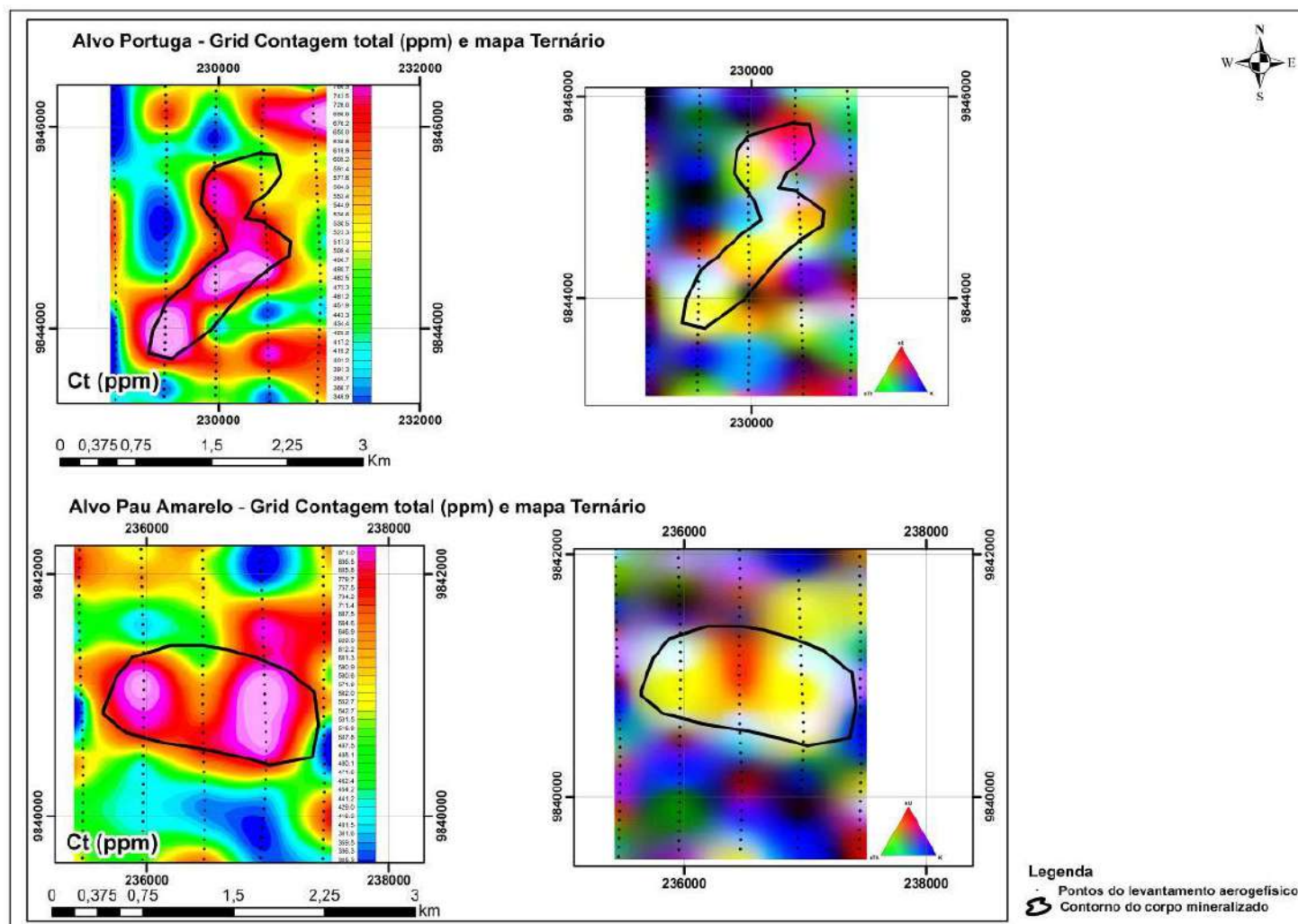
Fonte: Santos, 2019

Figura 49 - *Grids* dos rádio elementos para o Alvo Pau Amarelo



Fonte: O autor, 2019

Figura 50 - Grids do canal contagem total e imagem do ternário para os alvos de Laterita Fosfática



Fonte: O autor, 2019

5.2.3 Análise estatística dos alvos de laterita fosfática e ferruginosa

Tabela 3 - Estatística dos valores dos radioelementos para o Depósito Sapucaia

Depósito Sapucaia	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Ct (ppm)	U/Th	U/K	Th/k	Tendência de concentração na imagem do ternário
Mínimo	0,80	6,50	0,01	738,80	0,30	0,60	9,40	eU, eTh
Máximo	6,90	13,00	0,10	1345,20	0,50	108,30	247,90	
Média	3,85	9,75	0,06	1042,00	0,40	54,45	128,65	

Fonte: O autor, 2019

Tabela 4 - Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Trauíra

Alvo Trauíra	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Ct (ppm)	U/Th	U/K	Th/k	Tendência de concentração na imagem do ternário
Mínimo	0,50	4,40	0,20	566,40	0,10	0,80	6,70	eU, eTh
Máximo	3,10	10,80	0,80	1165,80	0,40	12,60	42,00	
Média	1,80	7,60	0,50	866,10	0,25	6,70	24,35	

Fonte: O autor, 2019

Tabela 5 - Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Serra do Pirocaua

Alvo Serra do Pirocaua	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Ct (ppm)	U/Th	U/K	Th/k	Tendência de concentração na imagem do ternário
Mínimo	0,70	3,80	0,10	401,00	0,20	2,80	13,60	eU, eTh
Máximo	2,50	9,40	0,30	797,00	0,30	31,50	128,40	
Média	1,60	6,60	0,20	599,00	0,25	17,15	71,00	

Fonte: O autor, 2019

Tabela 6 - Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Itacupim

Alvo Itacupim	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Ct (ppm)	U/Th	U/K	Th/k	Tendência de concentração na imagem do ternário
Mínimo	1,00	3,70	0,10	469,90	0,10	2,60	8,20	eU, eTh
Máximo	4,60	12,90	0,50	1226,10	0,50	46,40	170,80	
Média	2,80	8,30	0,30	848,00	0,30	24,50	89,50	

Fonte: O autor, 2019

Tabela 7 - Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Pau Amarelo

Alvo Pau Amarelo	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Ct (ppm)	U/Th	U/K	Th/k	Tendência de concentração na imagem do ternário
Mínimo	0,30	5,10	0,10	454,20	0,10	0,70	1,30	eU, eTh
Máximo	2,10	12,10	11,50	989,10	0,30	38,30	258,90	
Média	1,20	8,60	5,80	721,65	0,20	19,50	130,10	

Fonte: O autor, 2019

Tabela 8 - Estatística dos valores dos radioelementos para o Alvo Portuga

Alvo Portuga	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Ct (ppm)	U/Th	U/K	Th/k	Tendência de concentração na imagem do ternário
Mínimo	0,60	3,70	0,40	410,20	0,10	0,10	3,30	eU, eTh
Máximo	1,60	10,70	14,20	857,90	0,30	29,60	192,20	
Média	1,10	7,20	7,30	634,50	0,20	14,85	97,75	

Fonte: O autor, 2019.

CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Através da análise da gamaespectrometria terrestre nos Depósitos Sapucaia e Serrote, conclui-se que o método é eficaz na delimitação do corpo mineralizado.

Para o depósito Sapucaia nota-se que todos os canais do levantamento apresentam a delimitação do corpo, eU, contagem total, eTh, K, U/Th, U/K. Th/k. Na imagem do ternário o corpo é delimitado por concentrações dos três radioelementos, eU, eTh e K, pontualmente ocorrem concentrações de eU e eTh. No mapa das razões é nítida a concentração de eTh no centro do corpo em relação a eU e K.

No Depósito Serrote nem todos os canais representam a delimitação do corpo mineralizado. Os *grids* do canal eU, contagem total, eTh e Th/K apresentam as melhores correspondências com a mineralização. Nota-se claramente o enriquecimento de Th em relação ao U, em todo o corpo. Mesmo os canais que delimitam bem a mineralização, apresentam uma extensão além do corpo mineralizado, isso pode ser explicado pela diferença no método de execução do levantamento em relação ao do Depósito Sapucaia, já que no Serrote foi feito espaçado um metro do solo. A imagem do ternário também delimita a mineralização, com a mesma assinatura do Depósito Sapucaia, concentração dos três radioelementos, pontualmente com concentrações de U e Th.

A análise do aerolevantamento sobre as ocorrências de laterita fosfática e ferruginosa conhecidas demonstra claramente a delimitação dos corpos mineralizados. Para essa interpretação não serão utilizadas as ocorrências Boa Vista, Caeté, Tracuí, Cansa Perna e Jandiá, mesmo que algumas apresentem boa correspondência para alguns canais, devido ao fato do tamanho desses corpos, em todas as dimensões, serem menores que o espaçamento do aerolevantamento.

As ocorrências Sapucaia, Itacupim, Serra do Pirocaua e Trauíra apresentam correspondência com os canais eU, eTh, contagem total e imagem do ternário. As ocorrências de Sapucaia, Itacupim e Trauíra também apresentam correspondência nas razões. Sapucaia apresenta correspondência com a razão U/Th, Itacupim corresponde as razões U/K e Th/K, enquanto Trauíra apresenta correspondência com todas as razões.

Os alvos Portuga e Pau Amarelo, ocorrências de laterita ferruginosa, também se apresentam delimitados na análise dos canais eU, eTh, contagem total e imagem do ternário, assinatura coincidente com as laterittas fosfáticas. O Alvo Pau amarelo apresenta também uma ótima correspondência com a razão U/Th.

A assinatura geofísica das lateritas fosfáticas e ferruginosas é praticamente idêntica, sendo difícil a separação com uma simples análise dos *grids*. A análise estatística demonstra claramente uma diferença nos valores quantitativos nos canais eU e contagem total, diferença que pode ser utilizada para uma separação, mas ainda assim não descartaria uma visita a campo para distinção das lateritas. Outro ponto que dificulta é o modo de ocorrência, elas ocorrem praticamente na mesma cota e se apresentam sempre no mesmo contexto geomorfológico.

A delimitação das ocorrências de laterita fosfática conhecidas através do levantamento aéreo pode contribuir futuramente com correlações acerca da mineralogia dos horizontes superficiais dos lateritos fosfáticos.

O levantamento gamaespectométrico, seja terrestre ou aéreo, assim como já demonstrado para outras ocorrências de fosfato no Brasil, delimita os corpos de laterita enriquecidos em fosfatos de alumínio, sendo um método indireto que pode contribuir muito para a exploração de lateritas fosfáticas no NE do Pará e NW do Maranhão.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. A. M.; VILLAS, R. N. N.; HASUI, Y. Esboço estratigráfico do Pré-cambriano da região do Gurupi, Estados do Pará e Maranhão. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 31, p. 647-658, 1980.
- ALMARAZ, J. S. U.; CORDANI, U. G. Delimitação entre as províncias geocronológicas pré-cambrianas ao longo do Rio Gurupi. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 23, p.80, 1969.
- ALMEIDA, F. F. M. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, Salvador, BA, v. 23, p. 29-46, 1969.
- ALMEIDA, F. F. M.; MELCHER, G. C.; CORDANI, U. G.; KAWASHITA, K. Radiometric age determinations from northern Brazil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 17, n.1, p. 3-14, 2019.
- ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES, B. B. B.; CARNEIRO, C. D. R. The origin and evolution of the South American Plataform. **Earth Science Reviews**, v. 50, n. 1/2, p. 77-111, 2000.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. D. The upper precambrian of South America. **Boletim IG**, v. 7, p. 45-80, 1976.
- ASFAHANI, J. Phosphate Prospecting Using Natural Gamma Ray Well Logging in the Khneifiss Mine, Syria. **Exploration and Mining Geology**, v. 11, n. 1-4, p. 61-68, 2002.
- BRITO NEVES, B. B. Main stages of the development of the sedimentary basins of South America and their relationship with the tectonics of supercontinents. **Gondwana Research**, v. 5, n. 1, p. 175-196, 2002.
- BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A.; CORDANI, U. G. Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil: a case of tectonic heritage. **Journal of Geodynamics**, v. 1, n. 3-5, p. 495-510, 1984.
- CASTRO, D. L.; FUCK, R. A.; PHILLIPS, J. D.; VIDOTTI, R. M.; BEZERRA, F. H.; DANTAS, E. L. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. **Tectonophysics**, v. 614, p. 128-145, 2014.
- CORDANI, U. G.; MELCHER, G. C.; ALMEIDA, F. F. M. Outline of the precambrian geochronology of South America. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 5, p. 629-632, 1968.
- COSTA, J. L. Programa Grande Carajás: Castanhal, Folha SA. 23-VC-Estado do Pará. **Belém: CPRM**, 2000.

COSTA, J. B. S.; BORGES, M. S.; IGREJA, H. L. S.; HASUI, Y. Aspectos da evolução tectônica da Bacia do Paraíba e sua relação com o arcabouço pré-cambriano. In: **SBG, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos**, p. 96-98, 1991.

DA COSTA, M. L.; LEITE, A. S.; PÖLLMANN, H. A laterite-hosted APS deposit in the Amazon region, Brazil: The physical-chemical regime and environment of formation. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 170, p. 107-124, 2016.

CUNHA, F. M. B. Evolução paleozóica da bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico. 1986. 107 f. **Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 1986.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, p. 187-200, 1997.

FERREIRA, C.; MOREIRA-NORDEMANN, L. M.; NORDEMANN, D. JR. A radioatividade natural da região de Irecê, BA. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 2, p. 167-174, 2017.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 57-67, 1994.

HASUI, Y.; ABREU, F. A. M.; VILLAS, R. N. N. Província Parnaíba. In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (Coord.). **O Pré-Cambriano no Brasil**. São Paulo: Edgard Blücher, p. 36-45, 1984.

HURLEY, P. M.; RAND, J. R.; PINSON, W. H.; FAIRBAIRN, H. W.; DE ALMEIDA, F. F. M.; MELCHER, G. C., ... & VANDOROS, P. Test of Continental Drift by Comparison of Radiometric Ages: A pre-drift reconstruction shows matching geologic age provinces in West Africa and Northern Brazil. **Science**, v.157, n. 3788, p. 495-500, 1967.

KLEIN, E. L.; RODRIGUES, J. B.; LOPES, E. C.; SOLEDADE, G. L. Diversity of Rhyacian granitoids in the basement of the Neoproterozoic-Early Cambrian Gurupi Belt, northern Brazil: Geochemistry, U–Pb zircon geochronology, and Nd isotope constraints on the Paleoproterozoic magmatic and crustal evolution. **Precambrian Research**, v. 220, p. 192-216, 2012.

KLEIN, E. L.; LOPES, E. C. S. Geologia e recursos minerais da folha Centro Novo do Maranhão SA.23-Y-B-I, estado do Maranhão e Pará, escala 1:100.000. **Belém: CPRM**, p. 131, 2011.

KLEIN, E. L.; LUZARDO, R.; MOURA, C. A.; LOBATO, D. C.; BRITO, R. S.; ARMSTRONG, R. Geochronology, Nd isotopes and reconnaissance geochemistry of volcanic and metavolcanic rocks of the São Luís Craton, northern Brazil: implications for tectonic setting and crustal evolution. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 27, p. 129-145, 2009.

KLEIN, E. L.; LUZARDO, R.; MOURA, C. A.; ARMSTRONG, R. Geochemistry and zircon geochronology of paleoproterozoic granitoids: further evidence on the magmatic and crustal

evolution of the São Luís cratonic fragment, Brazil. **Precambrian Research**, v. 165, n.3-4, p. 221-242, 2008.

KLEIN, E. L.; MOURA, C. A. V.; PINHEIRO, B. L. S. Paleoproterozoic crustal evolution of the São Luís Craton, Brazil: evidence from zircon geochronology and Sm-Nd isotopes. **Gondwana Research**, v. 8, n. 2, p. 177-186, 2005b.

KLEIN, E. L.; MOURA, C. A. V. São Luís craton and Gurupi belt (Brazil): possible links with the West-African craton and surrounding Pan-African belts. In: PANKHURST, R. J. et al. (Eds.). **West Gondwana: pre-cenozoic correlations across the South Atlantic region**. Oxford: Blackwell, p. 137-151. (Geological Society London. Special Publication, n. 294), 2008.

KLEIN, E. L.; MOURA, C. A. V. Age constraints on granitoids and metavolcanic rocks of the São Luís craton and Gurupi belt, northern Brazil: implications for lithostratigraphy and geological evolution. **International Geology Review**, v. 43, p. 237-253, 2001.

LESQUER, A.; BELTRÃO, J. F.; ABREU, F. A. M. Proterozoic links between northeastern Brazil and West Africa: a plate tectonic model based on gravity data. **Tectonophysics**, v. 110, p. 9-26, 1984.

LOWELL, G. R. Petrology of the Bragança batholith, São Luís craton, Brazil. In: AUGUSTITHUS, S. S. (Ed.). **The crust: significance of granites-gneisses in the lithosphere**. Athens: **Theophrastus Publications**, p. 13-34, 1985.

MANÉ, M. A.; MELFI, A. J. Aplicação de métodos geofísicos (gamaespectrométricos e perfuração de poços) e imagens de satélite TM/Landsat na caracterização de zonas mineralizadas em fosfato (estudo de caso: Irecê-Bahia). **Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo**, 1998.

MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A. Sedimentary basin of South America. In: CORDANI, U. G. et al. (Ed.). **Tectonic evolution of South America**. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, p. 389-449, 2000.

MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, p. 39-50, 1997.

NUNES, K. C. Interpretação Integrada da Bacia do Parnaíba com Ênfase nos Dados Aeromagnéticos. In: **3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. 1993.

PALHETA, E. S.; ABREU, F. A. M.; MOURA, C. A. V. Granitóides proterozóicos como marcadores da evolução geotectônica da região nordeste do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 4, p. 647-657, 2009.

PASTANA, J. M. N. (Org.). **Turiaçu, folha SA.23-V-D, Pinheiro, SA.23-Y-B**: estados do Pará e Maranhão, escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1995. 205 p., il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB.

PINHEIRO, B. L. S.; MOURA, C. A. V.; KLEIN, E. L. Estudo de proveniência em arenitos das formações Igarapé de Areia e Viseu, nordeste do Pará, com base em datação de monocristais de zircão por evaporação de chumbo. **Simpósio de Geologia da Amazônia**, v. 8, 2003.

TORQUATO, J. R.; CORDANI, U. G. Brazil-Africa geological links. **Earth Science Reviews**, v. 17, n. 1-2, p. 155-176, 1981.

VASQUEZ, M. **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará**. CPRM, 2008.

WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 201-216, 1997.