



Universidade de Brasília – Instituto de Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas

# **PROSPECÇÃO DE URÂNIO NA FAIXA BRASÍLIA SETENTRIONAL POR REGRESSÃO LINEAR MULTIVARIADA**

**MARCOS MENEZES DA PAIXÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 39**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOFÍSICA APLICADA**

**Brasília-DF**

**Julho de 2012**



Universidade de Brasília – Instituto de Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas

# **PROSPECÇÃO DE URÂNIO NA FAIXA BRASÍLIA SETENTRIONAL POR REGRESSÃO LINEAR MULTIVARIADA**

**Marcos Menezes da Paixão**

**Orientadora: Prof. Dra. Roberta Mary Vidotti**

**Coorientador: Prof. Dr. Augusto César Bittencourt Pires**

Dissertação apresentada à Banca  
Examinadora do Instituto de Geociências  
como exigência final para obtenção do  
Título de Mestre em Geociências Aplicadas

**Brasília-DF**

**Julho de 2012**



Paixão, Marcos Menezes da

Prospecção de Urânio na Faixa Brasília Setentrional por Regressão Linear Multivariada. Brasília 2012. 94p.

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas.

Orientadora: Profa. Dra. Roberta Mary Vidotti

Coorientador: Prof. Dr. Augusto César Bittencourt Pires

1. Gamaespectrometria 2. Realce de anomalias 3. Formação Ticunzal



**PROSPECÇÃO DE URÂNIO NA FAIXA BRASÍLIA  
SETENTRIONAL POR REGRESSÃO LINEAR  
MULTIVARIADA**

**Marcos Menezes da Paixão**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Profa. Dra. Roberta Mary Vidotti (UnB)**

---

**Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho (UnB)**

---

**Profa. Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim (UFRGS)**

**Brasília-DF, 30 de Julho de 2012**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Roberta Mary Vidotti e Augusto César Bittencourt Pires, pela atenção dedicada e pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço à CPRM e ao Governo do Estado de Goiás/SIC/Funmineral pela cessão dos dados aerogeofísicos utilizados.

À empresa ESRI pela disponibilização do pacote de ferramentas que compõem a Família ArcGis 10 (contrato 2011 MLK 8733) e à empresa IMAGEM pelo apoio à concretização do termo de uso entre o IG-UnB e a ESRI e pelo suporte de software.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pelo apoio prestado à execução das pesquisas, especialmente ao prof. Nilson Francisquini Botelho, profundo conhecedor da geologia da região de estudo, sempre disponível aos discentes.

Às pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão da presente dissertação, amigos, colegas e chefes do trabalho.

Em especial, meus sinceros agradecimentos aos meus magníficos irmãos: André e Daniela e aos meus queridos pais: Cícero e Dilza, este trabalho é dedicado a vocês!



**“Triste época! É mais fácil desintegrar  
um átomo do que um preconceito.”**

**Albert Einstein**

**“A ciência é loucura, se o bom senso não a cura.”**

**Provérbio**



## RESUMO

A região nordeste do Estado de Goiás foi investigada pela Nuclebrás e CNEN nas décadas de 1970 e 1980 com vistas a detectar elementos radioativos, ocasião em que foram empreendidos os projetos prospectivos de urânio: Rio Preto e Campos Belos. Tais projetos identificaram mineralizações uraníferas estimadas em cerca de 1.000 toneladas de  $U_3O_8$ , consideradas de pequeno porte e, portanto, os trabalhos de pesquisa foram interrompidos. Entre os anos de 2005 e 2007 foram executados levantamentos aerogeofísicos que recobriram as áreas destes projetos e as continuidades das litologias conhecidamente anômalas para o Estado de Tocantins com dados de gamaespectrometria e magnetometria. Dados aerogeofísicos tem sido amplamente utilizados na detecção direta de corpos mineralizados em urânio. Entretanto, para áreas de grande variabilidade litológica a determinação de valores a serem considerados anômalos torna-se difícil, pois a concentração do elemento urânio é significativamente influenciada pelo tipo de rocha. O objetivo deste estudo é identificar novos alvos prospectivos de urânio na região de afloramento das litologias conhecidamente anômalas, aplicando a técnica de regressão linear múltipla aos dados aerogeofísicos que cobrem essas unidades na parte nordeste de Goiás e parte do sudeste de Tocantins para mitigar a influência litológica sobre as concentrações de urânio. Os resultados demonstram a eficácia da técnica proposta para a remoção das influências litológicas sobre as concentrações de urânio, conseguindo destacar as ocorrências de urânio conhecidas e identificar novos alvos prospectivos para este radioelemento na região.

**Palavras chave:** Gamaespectrometria, magnetometria, realce de anomalias, Formação Ticunzal, Suíte Aurumina.

## ABSTRACT

The northeastern part of the Goiás State was investigated by Nuclebrás and CNEN in the 1970s and 1980s in order to detect radioactive elements, when the following uranium exploration projects were undertaken: Rio Preto and Campos Belos. Such projects identified uranium mineralization estimated at about 1,000 tons of  $U_3O_8$ , which were considered small and, therefore, research work in the area was interrupted. Between 2005 and 2007, airborne geophysical surveys covered these projects areas and the extension of these uranium anomalous lithologies to the Tocantins State, with gamma-ray spectrometric and magnetic data. Aerogeophysical data has been widely used in the direct detection of mineralized uranium bodies. However, in areas of great lithological variability, the determination of the anomalous values becomes difficult because uranium concentration is significantly influenced by the rock type. The objective of this study is to identify new prospective targets for uranium in the region of outcrop of anomalous lithologies, using the multiple linear regression technique to the airborne geophysical data that cover these units in northeastern part of Goiás and southeastern part of Tocantins to mitigate the lithological influence on the uranium concentrations. The results demonstrate the effectiveness of the proposed technique for the removal of the lithological influences on the uranium concentrations, achieving highlight the known uranium occurrences and identify new prospective targets for this radioelement in the region.

**Keywords:** Gamma-ray spectrometry, magnetometry, highlight of anomalies, Ticunzal Formation, Aurumina Suite.



## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>v</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>17</b>
<b>Localização</b> .....	<b>17</b>
<b>Estrutura da Dissertação</b> .....	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>REVISÃO TEÓRICA</b> .....	<b>20</b>
<b>O Elemento Urânio</b> .....	<b>20</b>
<b>Aerogeofísica na Exploração de Urânio</b> .....	<b>23</b>
<b>Contexto Geológico</b> .....	<b>26</b>
<b>Regressão Múltipla Linear Aplicada a Dados Aerogeofísicos</b> .....	<b>28</b>
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>Dados Aerogeofísicos</b> .....	<b>31</b>
<b>Projeto Aerogeofísico do Estado de Goiás – 3ª Etapa</b> .....	<b>32</b>



Projeto Aerogeofísico Tocantins .....	33
Projeto Aerogeofísico Complemento do Tocantins .....	34
Dados Geológicos .....	35
Preparação dos Dados .....	36
Dados Gamaespectrométricos.....	36
Dados Magnetométricos .....	36
Processamento dos Dados .....	37
Aplicação da Regressão Múltipla Linear aos Dados .....	38
Apresentação e Interpretação dos Dados .....	41
Verificação de Campo .....	42

## **CAPÍTULO IV**

### **PROSPECÇÃO DE URÂNIO NO NORDESTE DE GOIÁS**

Resumo.....	43
Abstract.....	44
Introdução .....	45
Contexto Geológico .....	46
Geofísica Aérea na Prospecção de Urânio .....	48
Material.....	50
Método .....	51
Preparação dos Dados Gamaespectrométricos .....	52
Preparação dos Dados Magnetométricos.....	55
Regressão Múltipla Linear dos Dados .....	55
Apresentação e Interpretação dos Dados.....	57
Verificação de Campo.....	59



<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>60</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>63</b>
<b>Agradecimentos.....</b>	<b>64</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>64</b>

## **CAPÍTULO V**

### **PROSPECÇÃO DE URÂNIO NO SUDESTE DE TOCANTINS**

<b>Introdução .....</b>	<b>67</b>
<b>Objetivo.....</b>	<b>68</b>
<b>Localização.....</b>	<b>68</b>
<b>Contexto Geológico .....</b>	<b>70</b>
<b>Material e Métodos .....</b>	<b>72</b>
<b>Preparação dos Dados Gamaespectrométricos .....</b>	<b>74</b>
<b>Preparação dos Dados Magnetométricos.....</b>	<b>74</b>
<b>Regressão Múltipla Linear dos Dados .....</b>	<b>75</b>
<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>76</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>84</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>85</b>

## **CAPÍTULO VI**

<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>88</b>
------------------------	-----------

## **CAPÍTULO VII**

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>
---	-----------



## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo I

<b>Figura 1: Mapa de localização da área de estudo</b>	<b>18</b>
--	-----------

### Capítulo II

<b>Figura 1: Variação das concentrações de U nos diversos litotipos</b>	<b>23</b>
<b>Figura 2: Os três tipos de interação da radiação gama com a matéria</b>	<b>24</b>
<b>Figura 3: Espectro de raios gama obtido em levantamento aéreo</b>	<b>26</b>
<b>Figura 4: Mapa geológico simplificado da área de estudo</b>	<b>28</b>

### Capítulo III

<b>Figura 1: Localização da área de estudo e dos levantamentos aerogeofísicos</b>	<b>31</b>
<b>Figura 2: Fluxograma de processamento dos dados</b>	<b>38</b>
<b>Figura 3: Gráficos de dispersão das variáveis</b>	<b>39</b>

### Capítulo IV

<b>Figura 1: Mapa de localização da área de estudo</b>	<b>46</b>
<b>Figura 2: Mapa geológico simplificado da área de estudo</b>	<b>47</b>
<b>Figura 3: Mapas dos produtos aerogeofísicos</b>	<b>54</b>
<b>Figura 4: Gráficos de dispersão das variáveis</b>	<b>56</b>
<b>Figura 5: a) Mapa de Uan para a Área de Estudo. b) e c) Mapas geológicos das áreas dos projetos Rio Preto e Campos Belos</b>	<b>58</b>



## Capítulo V

<b>Figura 1: Mapa de localização da área de estudo</b>	.....	<b>69</b>
<b>Figura 2: Contexto geológico simplificado da área de estudo</b>	.....	<b>71</b>
<b>Figura 3: a) Mapa de concentração de urânio (eU); b) Mapa de concentração de tório (eTh)</b>	.....	<b>78</b>
<b>Figura 4: a) Mapa de concentração de potássio; b) Mapa da Amplitude do Sinal Analítico</b>	.....	<b>79</b>
<b>Figura 5: a) Mapa de concentração de Urânio teórico; b) Mapa de concentração de Urânio anômalo</b>	.....	<b>81</b>
<b>Figura 6: a) Mapa de <math>U_{AN}</math> para a Área Seleccionada 1 sobreposto à geologia simplificada; b) Mapa de <math>U_{AN}</math> para a Área Seleccionada 2 sobreposto à geologia simplificada</b>	.....	<b>82</b>
<b>Figura 7: a) Mapa de <math>U_{AN}</math> para a Área Seleccionada 3 sobreposto à geologia simplificada; b) Mapa de <math>U_{AN}</math> para a Área Seleccionada 4 sobreposto à geologia simplificada.</b>	.....	<b>83</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

### Capítulo II

<b>Tabela 1: Tipos de depósitos de urânio de acordo com o ambiente geológico de ocorrência</b>	.....	<b>21</b>
--	-------	-----------

### Capítulo III

<b>Tabela 1: Principais características dos levantamentos aerogeofísicos utilizados</b>	.....	<b>32</b>
---	-------	-----------

### Capítulo V

<b>Tabela 1: Principais características dos levantamentos aerogeofísicos utilizados em TO</b>	.....	<b>72</b>
---	-------	-----------

### INTRODUÇÃO

---

O desafio de promover o desenvolvimento das sociedades humanas com a preservação do meio ambiente para as atuais e futuras gerações passa, necessariamente, pela substituição do uso dos combustíveis fósseis, considerados altamente poluentes não obstante sua eficiência econômica, por fontes mais limpas e economicamente viáveis. Frente à crescente demanda por energia, a busca por energias renováveis, pouco poluentes e de pequeno impacto ambiental é incentivada no âmbito global. No entanto, muitas destas fontes alternativas aos combustíveis fósseis ainda são realidade apenas em escala experimental ou possuem, todavia, custos demasiadamente elevados.

Nesse contexto, o incremento na utilização de usinas nucleares para a geração de energia elétrica revela-se como importante alternativa, que oferece grande potencial energético a baixo custo e, devidamente conduzida, com baixo impacto ambiental e risco praticamente nulo ao bem-estar humano. Em novembro de 2011 existiam no mundo 434 reatores comerciais em operação, estando em construção mais 65, ou seja, com cerca de 15% de incremento a curto prazo. Em países como China e Índia há o planejamento de construir-se, até o ano de 2020, cerca de 60 novos reatores, adicionalmente aos que já se encontram em construção (Eletronuclear, 2011). Dado o aumento real da demanda e do potencial que se descortina em médio prazo, o preço do urânio disparou no mercado internacional atingindo recordes históricos a partir de 2005 (Ux Consulting Company, 2012).

Neste sentido, países detentores de grandes reservas de urânio têm se beneficiado por meio do aumento da produção. A Austrália, que possui uma das maiores reservas conhecidas, é também um grande exportador, muito embora não possua sequer uma planta geradora de energia nuclear. No Brasil, que, estima-se, possua a 6<sup>a</sup> maior reserva mundial, apesar do parco conhecimento geológico de seu território, o regime

exploratório adotado é o monopólio estatal, resquício de um período no qual a tônica da exploração era o uso militar. Dessa forma, criou-se um mecanismo de não-descoberta de jazidas uraníferas, uma vez que a identificação de suas ocorrências, mesmo que em associação com outros bens minerais, implica em indesejável intromissão estatal na atividade exploratória.

No entanto, o aumento da demanda e do preço internacional tem levado a uma pressão para a revisão desses parâmetros, no sentido de se permitir a prospecção e exploração de urânio pela iniciativa privada. Ressalte-se que, embora a indústria nacional já domine técnicas de enriquecimento do urânio, podendo exportar o combustível nuclear com alto valor agregado, o fato de a pesquisa de minerais radioativos no Brasil se encontrar oficialmente nas mãos de uma única empresa estatal, as Indústrias Nucleares Brasileiras (INB), não permite que o país avance na exploração econômica deste importante recurso.

Assim, a exploração uranífera no território brasileiro encontra-se estagnada desde o fim da guerra-fria, tendo experimentado seu auge nas décadas de 1970 e 1980. Levantamentos aerogeofísicos, principais ferramentas de prospecção de urânio, foram realizados, nesse período, especialmente por demanda das empresas estatais Nuclebrás<sup>1</sup>, extinta em 1988, e CNEN<sup>2</sup>. Como resultado desses esforços, foram identificadas ocorrências de minerais radioativos por todo o território nacional e, dentre elas, algumas de significativo potencial econômico, como os depósitos de Poços de Caldas-MG, Lagoa Real-BA e Itataia-CE.

O Levantamento Aerogeofísico do Projeto Serra da Mesa, realizado em 1973 por demanda do DNPM<sup>3</sup> e da CNEN, identificou anomalias de urânio na região nordeste do estado de Goiás, as quais motivaram a sondagem dos prospectos Rio Preto e Campos Belos. Entretanto, após o término dos programas iniciais de sondagem pela Nuclebrás, os dois prospectos somados foram estimados em cerca de 1.000t de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> e

---

1 Nuclebrás - Empresas Nucleares Brasileiras S/A.

2 CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear.

3 DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral.



considerados de pequeno porte, o que determinou a suspensão dos trabalhos de sondagem (Andrade *et al.*, 1985).

Entretanto, os esforços de prospecção sistemática de radioelementos realizados no Brasil até o momento o foram, em sua quase totalidade, há mais de três décadas. Neste meio tempo, os avanços tecnológicos experimentados, especialmente na área computacional, instrumental e nos métodos de posicionamento para a navegação aérea, proporcionaram elevado incremento na qualidade e precisão dos levantamentos aerogeofísicos e das técnicas de processamento utilizadas na interpretação destes dados.

Nesse contexto, a presente dissertação propõe nova prospecção de urânio nas unidades litológicas anômalas do embasamento setentrional da Faixa de Dobramentos Brasília, investigadas pelos projetos Rio Preto e Campos Belos, a partir de recentes e mais precisos levantamentos aerogeofísicos, com o apoio das modernas técnicas de processamento e com base no atual conhecimento geológico da região.

## **Objetivos**

O objetivo principal do presente trabalho consiste na geração de alvos prospectivos para o elemento urânio na porção setentrional da Faixa de Dobramentos Brasília, abrangendo as unidades litológicas portadoras das ocorrências minerais já identificadas pelos projetos exploratórios de urânio Rio Preto e Campos Belos. Subordinadamente, pretende-se avaliar a eficácia da técnica de regressão múltipla linear aplicada a dados aerogeofísicos, como forma de realçar concentrações ambientais anômalas de urânio, a partir de adaptação da metodologia proposta por Pires *et al.* (2010).

## **Localização**

Neste trabalho são investigadas as unidades litológicas que afloram na região de divisa entre o nordeste do Estado de Goiás e o sudeste do Estado de Tocantins, as quais foram recobertas por dados geofísicos em levantamentos realizados entre os anos de 2005 e 2007. O acesso à área estudada dá-se, a partir de Brasília-DF, pela rodovia GO-118 ou, a partir de Goiânia-GO, pela rodovia BR-153 (Fig. 1).

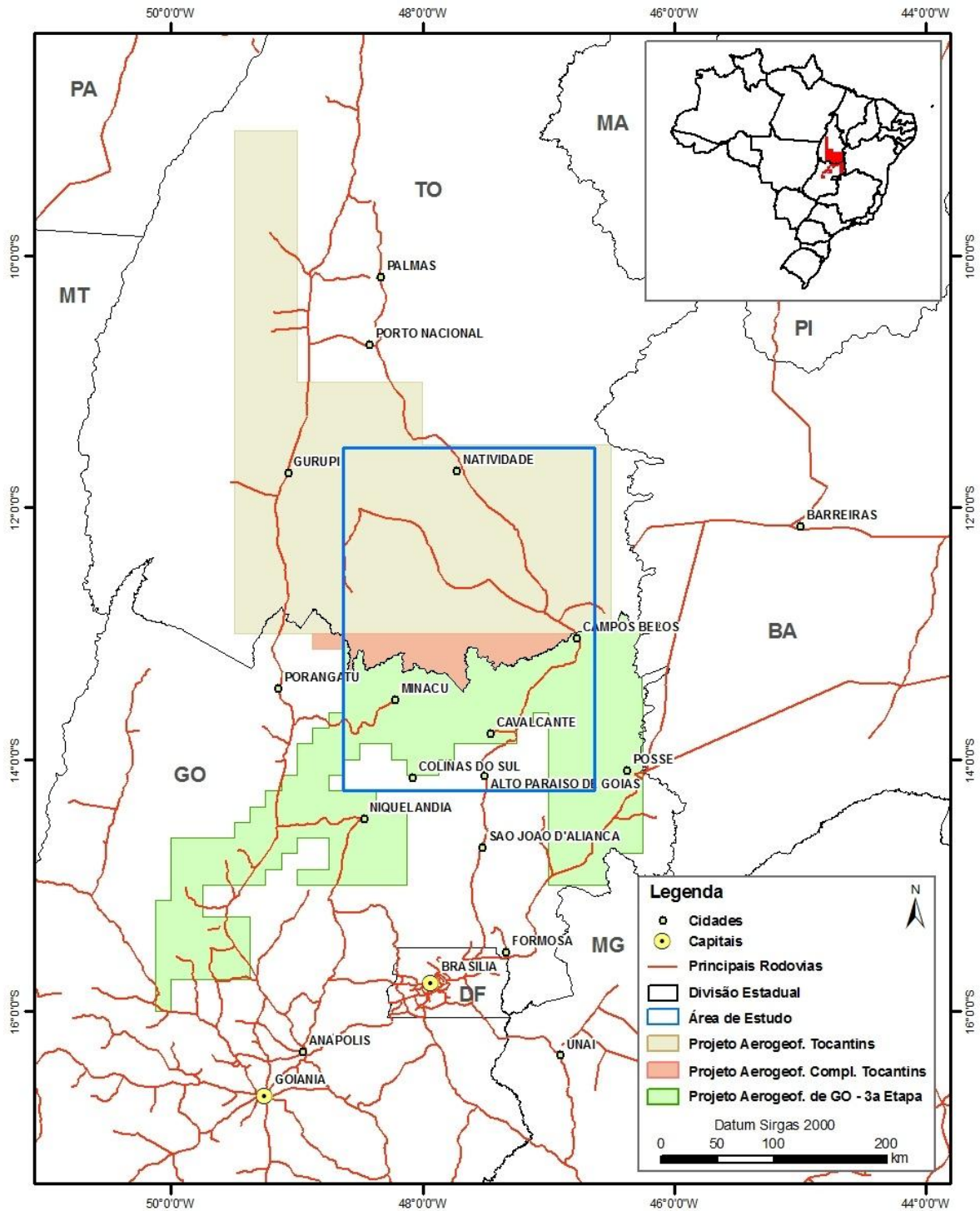


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo e dos levantamentos aerogeofísicos utilizados.



## **Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação possui estruturação baseada na elaboração de dois artigos científicos: o primeiro corresponde ao Cap. IV e já foi submetido para publicação à Revista Brasileira de Geofísica, o segundo corresponde ao Cap. V, que já foi parcialmente apresentado, como resumo expandido e de forma oral, no Simpósio de Geologia da Amazônia, realizado em outubro de 2011 na cidade de Boa Vista-RR (Paixão *et al.*, 2011) e o artigo completo correspondente está em fase final de elaboração.

Dessa forma, o leitor encontrará tópicos repetidos ao longo do texto, embora o autor tenha buscado a mínima redundância, adotando a seguinte estruturação:

- Os Capítulos II e III dão ênfase às características comuns em termos de revisão teórica e bibliográfica dos capítulos subseqüentes, além de apresentar o material utilizado e a metodologia aplicada;
- Os Capítulos IV e V são referentes aos trabalhos citados e contém as informações específicas quanto à revisão teórica e a metodologia de cada um destes capítulos;
- O Capítulo VI apresenta as conclusões gerais da dissertação conforme as conclusões parciais dos capítulos IV e V;
- O Capítulo VII apresenta todas as referências bibliográficas utilizadas na dissertação.

### REVISÃO TEÓRICA

---

#### O Elemento Urânio

O urânio é o elemento químico de número atômico 92, sendo natural e comum, mais abundante que a prata, com abundância comparável à do molibdênio e arsênio, porém quatro vezes menor que a do tório. Foi descoberto em 1789 pelo alemão Martin Klaproth, sendo neste elemento onde se descobriu a propriedade da radioatividade, em 1896 por Henri Becquerel. Seus isótopos mais comuns têm meia vida de ~4,5 bilhões de anos para o  $^{238}\text{U}$  e de ~700 milhões de anos para o  $^{235}\text{U}$ . O urânio é utilizado na indústria bélica e como combustível em usinas nucleares para geração de energia elétrica (IAEA, 2003; Teixeira *et al.*, 2000).

A Agência Internacional de Energia Atômica estimou as reservas mundiais de urânio em 5,4 milhões de toneladas em todo mundo em 2009, sendo que 31% estão na Austrália, 12% no Cazaquistão, 9% no Canadá e 9% na Rússia. As reservas brasileiras aparecem na sexta colocação, representando cerca de 5% das reservas mundiais. A produção mundial aumentou cerca de 50.000 toneladas em 2009 em relação a 2008, sendo os maiores produtores em 2009: o Cazaquistão (28%), o Canadá (20%), a Austrália (16%), a Namíbia (9%), a Rússia (7%), o Níger (6%) e o Uzbequistão (5%) (IAEA, 2009).

Segundo Dahlkamp (1993), depósitos de urânio são formados em quase todos os ambientes geológicos, desde ambiente superficial sedimentar, passando por diagenético, vulcânico, hidrotermal, metassomático, plutônico até metamórfico de alto grau. A Tab. 1 apresenta exemplos de depósitos de urânio classificados de acordo com o ambiente geológico.

**Tabela 1: Tipos de depósitos de urânio de acordo com o ambiente geológico de ocorrência, adaptado de IAEA (2009).**

<b>Tipos de Depósitos</b>	<b>Associação Geológica</b>	<b>Descrição Geológica</b>	<b>Exemplos de Depósitos</b>
Tipo Inconformidade	Ígnea/metamórfica - sedimentar	Continental – Bacia pós-orogênica	Rabbit Lake, Cigar Lake, Athabasca basin, Saskatchewan, Canadá;
Depósitos em Arenitos	Sedimentar	Continental – Bacia pós-orogênica	Colorado Plateau, EUA; Moykum, Inkay, Cazaquistão; Westmoreland, Austrália; Akouta, Níger
Complexos de Brechas Hematíticas	Ígnea	Rochas Ígneas ácidas	Olimpic Dam, Austrália
Conglomerados com Seixos de Quartzo	Sedimentar	Continental – Bacia pós-orogênica	Witwatersrand basin, África do Sul; Blind River/Elliot Lake, Canadá
Depósitos em Veios	Sedimentar	Continental – Bacia pós-orogênica	Schwartzwalder, EUA; Dhaba district, Congo
	Ígnea	Associado com fluidos hidrotermais	Limousin, Massif Central, França; Meseta Ibérica, Espanha e Portugal
	Metamórfica	Associado com fluidos hidrotermais	Pňbram, República Checa
Depósitos Intrusivos	Ígnea	Complexos Alcalinos	Rössing, Namíbia; Ilimaussac, Groenlândia; Palabora, África do Sul
Depósitos Relacionados a Vulcões e Caldeiras	Ígnea	Vulcânicas Félsicas	Streltsovsk caldera, Rússia; Dornot deposit, Mongólia; Nopal deposit, México
Metassomatitos	Ígnea		Pevomayskoye, Ucrânia; Lagoa Real, Brasil; Valhalla, Austrália
Depósitos Superficiais	Sedimentar		Yeellrrie, Austrália; Langes Heinrich, Namíbia
Dutos em Brechas de Colapso	Sedimentar	Continental	Arizona Strip, Grand Canyon, EUA.
Depósitos em Fosforitos	Sedimentar	Depósitos Marinhos	Uncle Sam, US; Gantour, Marrocos; Al-Abiad, Jordânia
Outros tipos	Metamórfica	Metamórfica	Forstau, Áustria
	Sedimentar	Calcário	Grants, EUA
		Carvão rico em urânio	Serres Basin, Grécia; Dakotas Norte e Sul, EUA
Rochas com Alto Conteúdo de U	Ígnea	Pegmatito	Greenbushes, Austrália
		Granito	Austrália; Nepal
	Sedimentar	Folhelho negro	Chatanooga shale, EUA; Chanziping, China; Gera-Ronneburg, Alemanha.



A geoquímica do urânio é governada principalmente por seu estado de oxidação. O íon uranila ( $\text{UO}_2^{2+}$ ) é altamente móvel sob condições oxidantes e forma mais de 40 diferentes complexos com os ânions hidroxila, carbonato, sulfato, cloreto, fosfato, fluoreto e silicato (Langmur, 1978). Na maioria dos depósitos a precipitação deste elemento decorre da interação de fluidos oxidantes, ricos em complexos de urânio, com materiais redutores, especialmente aqueles ricos em carbono (Cuney, 2009). As mineralizações são compostas de minerais como a uraninita, a uranotorita, a uranotorianita e a uranoesferita, enquanto que em rochas não mineralizadas o urânio está presente na estrutura de minerais como zircão, monazita e alanita. Sua concentração média na crosta continental superior é de 2,7 ppm, geralmente sendo maior em rochas ácidas e menor em rochas básicas, com proporcionalidade direta ao teor de sílica (Minty, 1997). Rochas ígneas máficas possuem baixos teores médios, geralmente abaixo de 2 ppm, enquanto rochas ígneas félsicas possuem teores médios duas ou três vezes maiores. Rochas sedimentares apresentam grande variabilidade nas concentrações médias de urânio em função das diversas possibilidades de rochas-fonte, ambientes e processos de transporte. Tendem a ser empobrecidas em urânio, mas podem apresentar *background* semelhante a granitos (Wilford, 2011). Portanto, o elemento urânio está presente nas mais diversas litologias e sua concentração apresenta ampla variação, geralmente dependente do teor de sílica da rocha, além de ser muito influenciada por processos geológicos (Fig. 1).

Da grande variabilidade do *background* de urânio nos diferentes litotipos surge a dificuldade em se determinar valores a serem considerados anômalos, especialmente em áreas com grande diversidade litológica.

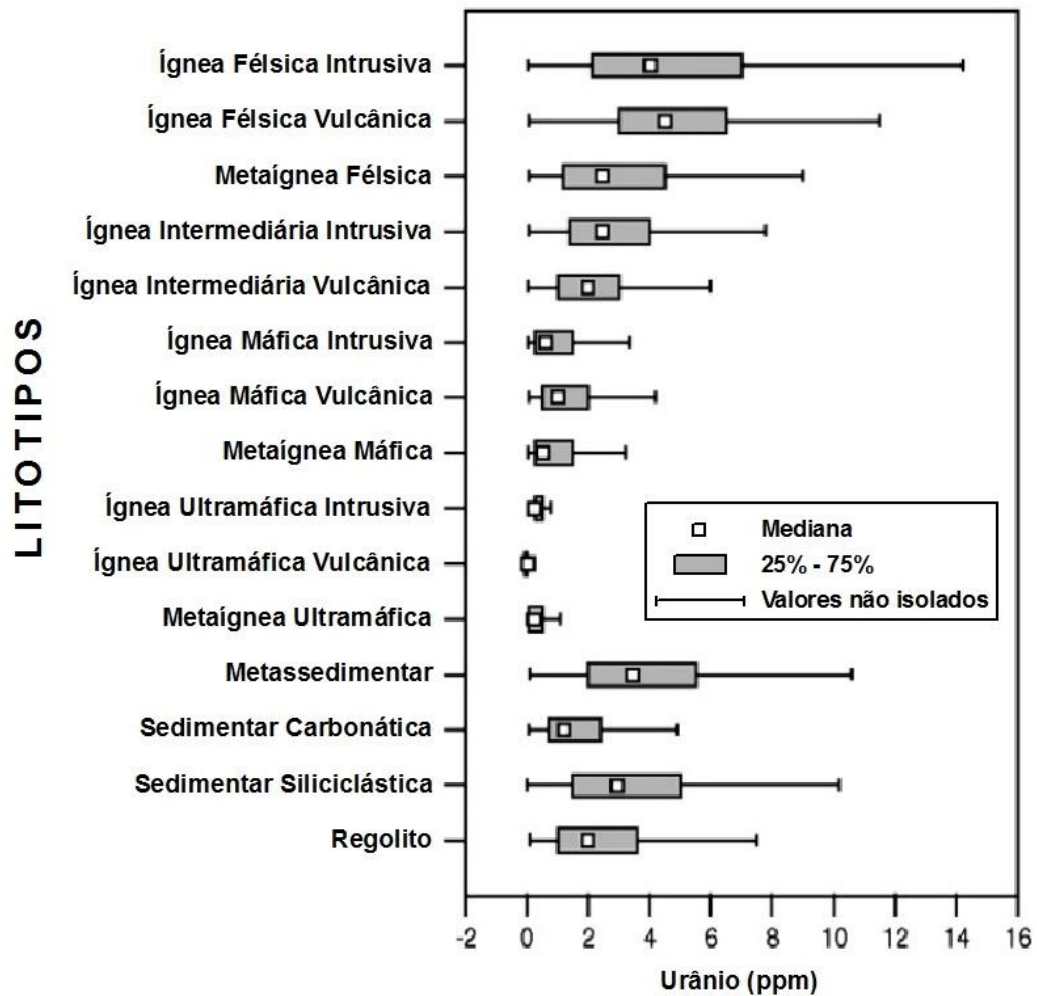
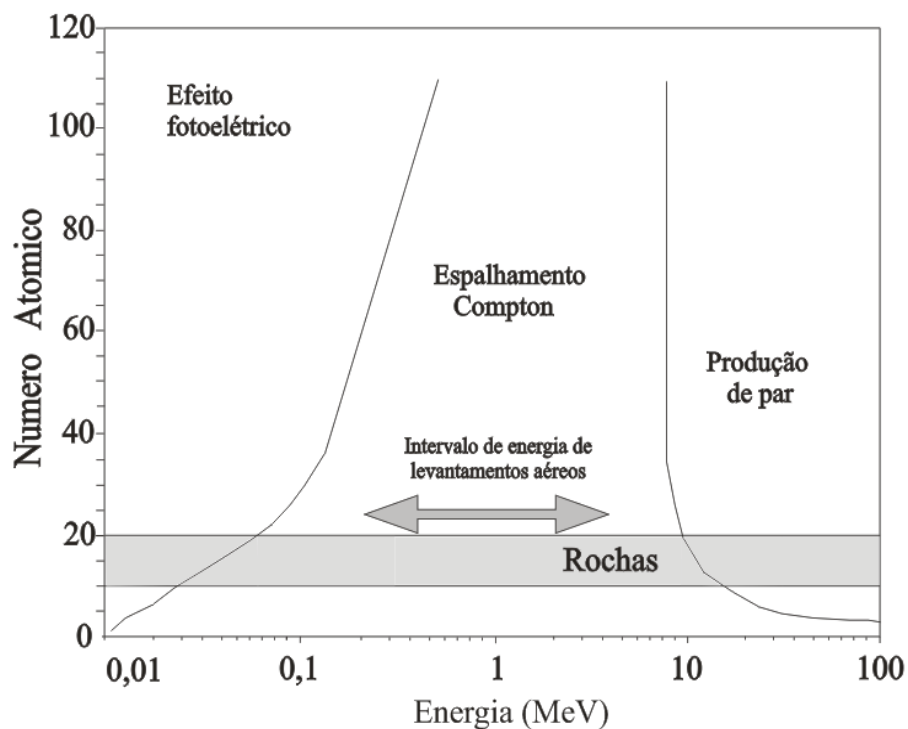


Figura1: Variação das concentrações de U (ppm) de acordo com diversos litotipos. Dados geoquímicos referentes a 30.000 amostras de rocha total da Austrália (Wilford, 2011).

### Aerogeofísica na Exploração de Urânio

A partir da descoberta da radioatividade por Becquerel em 1896, diversos avanços ocorreram na compreensão deste fenômeno e, em seguida, nas décadas de 1930 e 1940, iniciou-se a busca por formas de utilização da energia nuclear. A procura por concentrações exploráveis de radioelementos nas décadas subsequentes baseou-se fortemente na gamaespectrometria aérea (IAEA, 2003).

As radiações de substâncias naturais são classificadas em três diferentes tipos: a radiação alfa ( $\alpha$ ) é caracterizada por uma energia pouco penetrativa, sendo barrada por uma fina lâmina de papel, causando pequena ionização no ar; o segundo tipo, as partículas beta ( $\beta$ ), apresenta energia penetrativa maior e ioniza o ar por alguns centímetros, podendo facilmente atravessar uma lâmina metálica com poucos milímetros de espessura; o terceiro tipo, os raios gama ( $\gamma$ ), pode ionizar o ar a até 300 metros (Grasty, 1979) e, por isso, é registrado em levantamentos gamaespectrométricos aéreos. A energia penetrativa dos raios  $\gamma$  é cem vezes maior do que a dos raios  $\beta$ , de forma que aqueles podem penetrar em mais de 30cm de rocha e centenas de metros no ar (Minty, 1997). Existem três processos principais pelos quais a radiação gama interage com a matéria: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de par (Fig. 2).



**Figura 2:** Os três tipos de interação da radiação gama com a matéria, de acordo com o nível de energia e o número atômico do elemento-meio (Minty, 1997).





O efeito fotoelétrico resulta da absorção total da energia do raio gama pelo elétron exterior de um átomo, sob a forma de energia cinética. O efeito Compton é análogo, porém apenas parte da energia dos raios gama é absorvida, alterando-se, nesse processo, o nível de energia e a trajetória original do raio gama. Na produção de par o raio gama incidente é completamente absorvido pelo núcleo do átomo, resultando na criação de um par elétron-pósitron no campo eletrostático do núcleo atômico.

Os levantamentos gamaespectrométricos aéreos registram uma faixa energética que se situa exclusivamente na zona de predominância do efeito Compton, sendo desprezíveis os efeitos dos outros processos sobre os dados obtidos por essa técnica. As fontes da radiação gama medida nos levantamentos aéreos são os isótopos instáveis presentes nas rochas e nos solos, tipicamente com profundidades máximas de até 40 cm, excepcionalmente alcançando 100 cm (Wilford, 2011). Os radioisótopos mais abundantes na natureza e que permitem sua utilização nos levantamentos aéreos são:

- $^{40}\text{K}$  que representa 0,012% do K total (outros isótopos,  $^{39}\text{K}$  e  $^{41}\text{K}$  não são radioativos e representam respectivamente 93,2581% e 6,7302% do K total);
- Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  (representa 99,2743% do U total, sendo o restante composto pelos isótopos  $^{235}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$  que não são medidos em levantamentos);
- Série de decaimento do  $^{232}\text{Th}$  (100% do Th total).

A concentração média na crosta superior do elemento K é de 2,5%, do elemento U é de 2,8 ppm e do elemento Th é de 12 ppm (IAEA, 2003). As concentrações desses elementos podem ser estimadas por meio da análise do espectro gama registrado durante os levantamentos aéreos (Fig. 3).

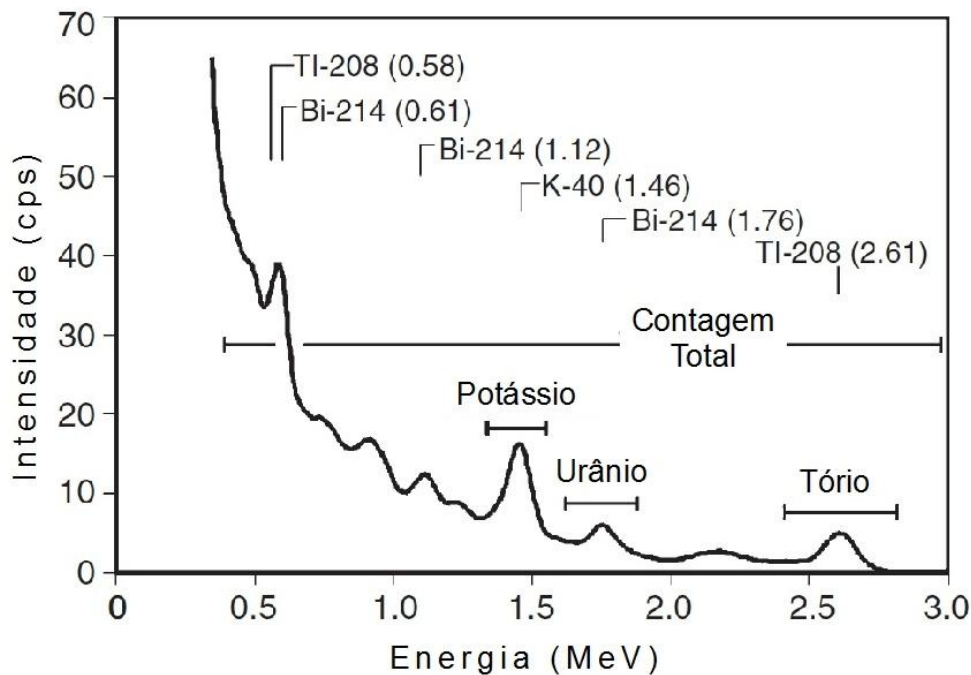


Figura 3: Espectro de raios gama obtido em levantamento aéreo mostrando os fotopicos diagnósticos e as posições das faixas de energia, correspondentes ao K, U e Th, usadas na gamaespectrometria (Wilford & Minty, 2007).

Algumas correções devem ser feitas nos dados espectrais observados durante o levantamento, com o intuito de remover efeitos indesejáveis. São realizados procedimentos para a correção do espalhamento Compton, da radiação proveniente da aeronave e de raios cósmicos (correção de *background*), correção da altura de voo e finalmente a transformação de contagens para concentração dos radioelementos. A descrição pormenorizada desses procedimentos pode ser encontrada em IAEA (2003).

### Contexto Geológico

A região de interesse está inserida em uma das faixas móveis que integram a Província Estrutural Tocantins (Almeida *et al.*, 1977): a Faixa de Dobramentos Brasília - FDB. Segundo Fuck (1994), a FDB abrange duas zonas com distintos padrões de metamorfismo e deformação, a Zona Interna e a Zona Externa, além do Maciço e do Arco Magmático de Goiás. A Zona Externa, com metamorfismo fácies xisto-verde a anfíbolito, bordejando longitudinalmente o limite oeste do Cráton São Francisco e compreende coberturas



metassedimentares meso/neoproterozóicas extensas, como os Grupos Paranoá e Bambuí, além de exposições do embasamento em sua porção setentrional.

As ocorrências conhecidas de urânio no nordeste goiano são encontradas no embasamento da FDB Setentrional, composto pelo Complexo Almas-Cavalcante e por coberturas metassedimentares paleoproterozóicas, como os Grupos Arai, Serra da Mesa e Natividade. O Complexo Almas-Cavalcante foi discriminado na região de interesse em três distintas unidades geológicas: a Formação Ticunzal (Marini *et al.*, 1978), a Suíte Peraluminosa Aurumina (Botelho *et al.*, 1999) e os granitos da Província Estanífera de Goiás (Botelho 1992). Geocronologicamente temos na Formação Ticunzal a unidade mais antiga, a qual é intrudida pela Suíte Aurumina de idades U/Pb entre 2,27 a 2,02 Ga em pegmatito (Sparrenberguer & Tassinari, 1998). Tanto a Formação Ticunzal como a Suíte Aurumina foram intrudidas pelos Granitos Estaníferos de Goiás, que apresentam idades de 1,77 a 1,58 Ga (Pimentel *et al.*, 1999).

As mineralizações de urânio ocorrem principalmente nas rochas da Fm Ticunzal (Andrade *et al.*, 1985) e, de forma subordinada, em rochas da Suíte Aurumina, anteriormente denominada na região como Complexo Basal (Duarte & Bonotto, 2006). A Formação Ticunzal, com duas sub-unidades, é composta predominantemente por grafitaxistos, ocorrendo também paragnaisses e mica-xistos em sua unidade inferior, bem como quartzo-xistos e turmalina-xistos na unidade superior. A Suíte Aurumina é composta por granitos e tonalitos peraluminosos, deformados e, por vezes, milonitizados. Assim como a Fm Ticunzal, esses granitos afloram nas porções baixas do relevo, tipicamente nos vales delimitados por escarpas dos quartzitos do Grupo Arai. A Fig. 4 apresenta uma simplificação da geologia regional.

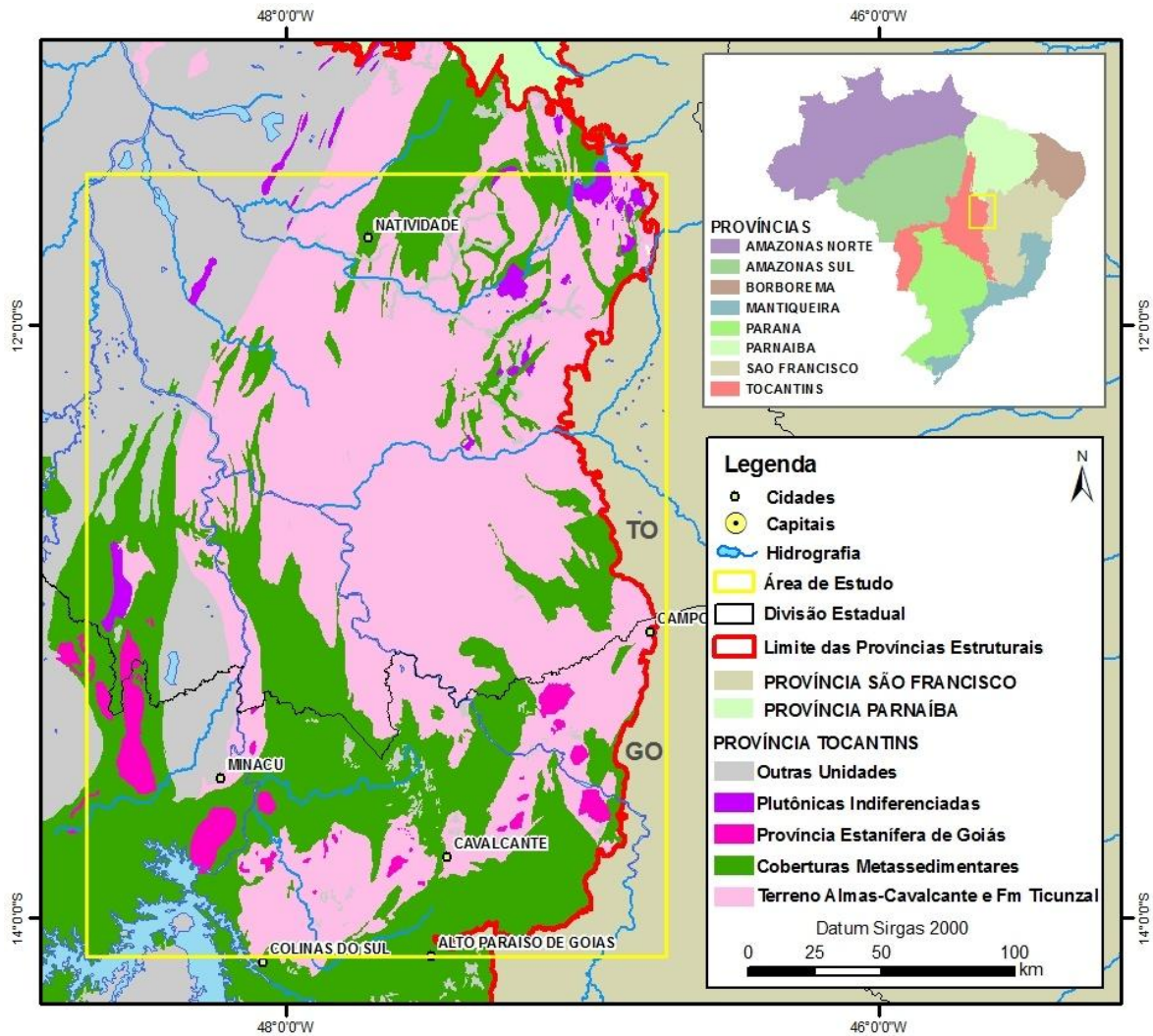


Figura 4: Mapa geológico simplificado da área de estudo. Adaptado de Schobbenhaus *et al.* (2004).

Os contatos geológicos entre as duas unidades citadas na literatura como portadoras de mineralizações não são bem definidos na área de estudo, o que motivou, para a prospecção pretendida, a abordagem de ambas como uma única unidade-alvo.

### Regressão Múltipla Linear Aplicada a Dados Aerogeofísicos

Segundo Pires *et al.* (2010) a técnica de regressão múltipla linear entre as concentrações estimadas de radioelementos pode ser usada para modelar e remover os efeitos de processos geológicos dentro de diferentes litotipos. O método é útil na remoção de



mudanças sistemáticas grosseiras nessas concentrações e também pode ser utilizado para realçar valores discrepantes da distribuição média de teores dentro de uma unidade (Pires, 1995). O procedimento consiste na geração de um modelo linear de regressão com múltiplas variáveis independentes e apenas uma variável dependente. Teoricamente, o modelo gerado permite inferir a contribuição das variáveis independentes na formação ou construção da variável dependente.

O tório (Th) é considerado um bom mapeador litológico em função de sua pouca mobilidade no ambiente superficial (Pires, 1995). Já o potássio (K), embora apresente maior mobilidade sob as mesmas condições, é um importante elemento maior constituinte de minerais formadores de rochas e, deste modo, indica a variação dos litotipos em superfície (IAEA, 2003). Destarte, as concentrações superficiais de Th e K podem ser utilizadas para prever a contribuição litológica do U, uma vez que este, por sua vez, possua alguma correlação com aqueles radioelementos.

Adicionalmente, Pires *et al.* (2010) também utiliza como variável independente o produto magnetométrico Amplitude do Sinal Analítico (ASA) para contribuir na caracterização da distribuição espacial de litotipos. Este produto foi definido por Roest *et al.* (1992) como a raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas de anomalias magnéticas em relação às direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Seus efeitos sobre as anomalias magnéticas são semelhantes aos obtidos na Redução ao Pólo, pois posiciona as anomalias diretamente sobre o centro de unidades magnéticas no caso de corpos estreitos e sobre os limites de unidades magnéticas em corpos mais largos (Milligan & Gunn, 1997). A ASA possui ainda a vantagem de ser completamente independente da direção de magnetização e da direção do campo magnético da Terra, o que lhe garante a característica de não estar sujeito a instabilidades que ocorrem em transformações de campos magnéticos em baixas latitudes magnéticas (MacLeod *et al.*, 1993), além de definir a posição de fontes magnéticas sem a influência de magnetização remanescente (Milligan & Gunn, 1997). Entretanto, ressalta-se que como as fontes magnéticas podem ser profundas e sequer aflorarem à superfície, sua associação com litotipos aflorantes nem sempre é possível.



Assim, a Eq. (1) busca relacionar de maneira linear essas variáveis independentes a teores de urânio que devem refletir a flutuação intrínseca à variação litológica:

$$U_{(K, Th, ASA)} = cte + aK + bTh + cASA \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$U_{(K, Th, ASA)}$  = concentração teórica de urânio em função das concentrações de potássio, tório e da amplitude do sinal analítico;

**cte** = constante;

**a, b e c** = coeficientes de regressão linear para K, Th e ASA, respectivamente.

A partir da Eq. (1) procede-se à determinação dos coeficientes de regressão linear utilizando-se os canais dos três radioelementos e da ASA observados. Em seguida, estes coeficientes são utilizados no cálculo de uma concentração teórica do elemento urânio ( $U$  teórico), de notação  $U_{(K, Th, ASA)}$  que, para este modelo, deve representar a variação da concentração de  $U$  nas diferentes rochas. Por fim, o  $U_{(K, Th, ASA)}$  é subtraído do canal do  $U$  observado, gerando uma nova concentração de urânio, teoricamente com significativa atenuação da influência litológica ( $U$  anômalo).

## MATERIAL E MÉTODOS

### Dados Aerogeofísicos

Visando a geração de alvos prospectivos para o elemento urânio, utilizou-se dados de gamaespectrometria e magnetometria de três distintos levantamentos geofísicos aéreos que em conjunto abrangem a totalidade da área de interesse, um para o Estado de Goiás e dois para o Estado de Tocantins (Fig. 1).

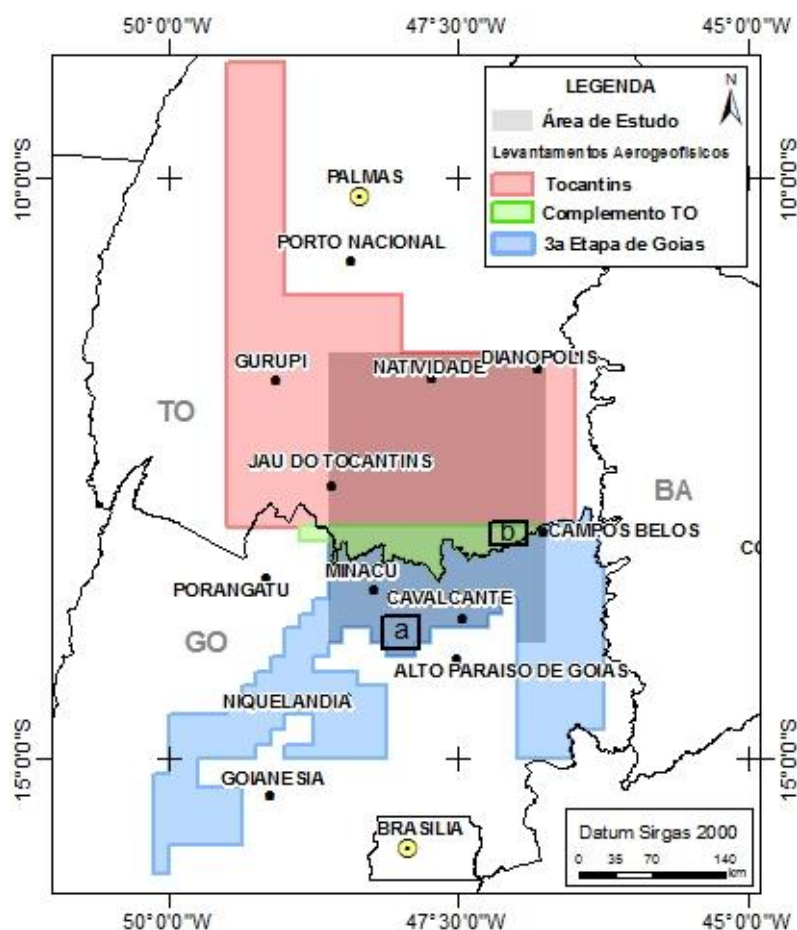


Figura 1: Localização da área de estudo e dos levantamentos aerogeofísicos utilizados. a = área do Projeto Rio Preto e b = área da ocorrência de urânio do Alecrim.



Todos os aerolevantamentos utilizados foram adquiridos com linhas de voo orientadas na direção N-S, espaçamento de 500m e altura nominal de voo de 100m, embora tenham sido utilizados distintos equipamentos e aeronaves. A Tab. 1 apresenta as principais características desses aerolevantamentos.

**Tabela 1: Principais características dos levantamentos aerogeofísicos utilizados.**

<b>PROJETO</b>	<b>3ª ETAPA GOIÁS</b>	<b>TOCANTINS</b>	<b>COMPLEMENTO TOCANTINS</b>
<b>Código CPRM</b>	3013	1073	1071
<b>Intervalo de Amostragem</b>	0,1s Mag. e 1,0s Gama.	0,1s Mag. e 1,0s Gama.	0,1s Mag. e 1,0s Gama.
<b>Altura Nominal de Voo</b>	100m	100m	100m
<b>Linhas de Voo: Esp./Dir.</b>	0,5km/N-S	0,5km/N-S	0,5km/N-S
<b>Linhas de Controle: Esp./Dir.</b>	5,0km/E-W	10,0km/E-W	10,0km/E-W
<b>Velocidade Aprox. de Voo</b>	290km/h	270km/h	240km/h
<b>Aeromagnetômetro</b>	Scintrex CS-2	Scintrex CS-3	Scintrex CS-2
<b>Gamaespectrômetro Aéreo</b>	Exploranium GR 820 - 256 ch	PicoEnvirotec GRS410 - 512 ch	Exploranium GR 820 - 256 ch
<b>Tempo de Integração Gama</b>	1,0s	1,0s	1,0s

*Projeto Aerogeofísico do Estado de Goiás – 3ª Etapa*

Este levantamento recobre a totalidade da área de interesse no estado de Goiás, é denominado Paleo-Neoproterozóico de Goiás, mas também conhecido como Área V. Foi concebido no âmbito de convênio entre o Governo Federal, por meio da CPRM e do Ministério de Minas e Energia, e o Governo de Goiás, por meio da Secretaria de Indústria e Comércio e do Funmineral, sendo que seus dados foram cedidos ao IG-UnB pela





Superintendência de Geologia e Mineração da Secretaria de Indústria e Comércio do Estado de Goiás.

O levantamento foi realizado pela Lasa Engenharia e Prospecções S/A em 2006 e possui espaçamento de 0,5 km entre as linhas de voo, orientadas na direção Norte-Sul e 5,0 km entre as linhas de controle, orientadas na direção Leste-Oeste, com altura nominal de vôo de 100 metros. De acordo com o Relatório Técnico do projeto (Lasa, 2006), o levantamento de dados contou com duas aeronaves em sua execução, um Cessna 404 Titan (PT-FZN), que sobrevoou a porção oeste entre 1º de maio e 10 de julho de 2006, e um Piper Navajo PA31 (PT-WOT), que sobrevoou a porção leste entre 8 de junho e 1º de setembro de 2006. Os dados utilizados neste estudo foram obtidos exclusivamente pela aeronave de prefixo PT-WOT, com o gamaespectrômetro Exploranium GR-820, de 256 canais, com detectores de cristais de Iodeto de Sódio ativados a Tálcio com volume total de 2.560 polegadas cúbicas, das quais 512 são de cristais voltados para cima (*upward looking*) e o restante de cristais voltados para baixo (*downward looking*).

O magnetômetro aéreo utilizado foi o Scintrex CS-2, com sensor de vapor de Césio montado na cauda da aeronave (montagem Stinger), com faixa de sensibilidade de 20.000 a 95.000 nT e resolução de 0,001 nT. Foi também utilizado magnetômetro terrestre Overhauser GEM GSM-19. As leituras do gamaespectrômetro foram realizadas a cada 1,0s e do magnetômetro a cada 0,1s o que, dada a velocidade aproximada de vôo da aeronave PT-WOT (287 km/h), corresponde a uma medida a cada 80 metros e 8 metros, respectivamente. Aos dados magnetométricos e gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico do Estado de Goiás - 3ª Etapa foram aplicadas correções e realizado pré-processamento visando adequar os dados a processamento e interpretação finais, conforme discriminado no Relatório Técnico correspondente (Lasa, 2006).

#### *Projeto Aerogeofísico Tocantins*

Este levantamento recobre a maior parte da área de interesse no estado de Tocantins e foi concebido no âmbito do Programa Geologia do Brasil, empreendido pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM/MME, que cedeu os dados ao IG-UnB.



A aquisição dos dados aerogeofísicos deste levantamento foi realizada pela empresa AeroGeoPhysica LatinoAmerica (AGP-LA) e possui espaçamento de 0,5 km entre as linhas de vôo, orientadas na direção Norte-Sul e 5,0 km entre as linhas de controle, orientadas na direção Leste-Oeste, com altura nominal de voo de 100 metros . De acordo com o Texto Técnico do projeto, contou com duas aeronaves Cessna modelo C-208 B (PT-MEB e PT-MEX), em sua execução. A aeronave PT-MEB cobriu a área a oeste do meridiano 48°15'W entre os dias 26 de junho a 21 de dezembro de 2005 e a aeronave PT-MEX cobriu a área a leste deste meridiano entre os dias 6 de agosto de 2006 e 1° de janeiro de 2007. Os dados utilizados neste estudo estão contidos na área leste e foram obtidos exclusivamente pela aeronave de prefixo PT-MEX, com o gamaespectrômetro PicoEnvirotec GR-410, de 512 canais, com detectores de cristais de Iodeto de Sódio ativados a Tálcio com volume total de 3.584 polegadas cúbicas, das quais 512 são de cristais voltados para cima (*upward looking*) e o restante voltados para baixo (*downward looking*).

O magnetômetro aéreo utilizado foi o Scintrex CS-3, com sensor de vapor de Césio montado na cauda da aeronave (montagem *Stinger*), com faixa de sensibilidade de 15.000 a 105.000 nT e resolução de 0,001 nT. Foi também utilizado magnetômetro terrestre Scintrex SM-1. As leituras do gamaespectrômetro foram realizadas a cada 1,0s e as do aeromagnetômetro a cada 0,01s e decimadas para 0,1s o que, dada a velocidade aproximada de voo da aeronave PT-MEX (270 km/h), corresponde a uma medida radiométrica a cada 75 metros e uma magnetométrica a cada 7,5 metros. Aos dados magnetométricos e gamaespectrométricos do Projeto Tocantins foram aplicadas correções e realizado pré-processamento visando adequar os dados a processamento e interpretação finais, conforme discriminado no Texto Técnico correspondente, elaborado pela AeroGeoPhysica LatinoAmerica (AGP-LA, 2006).

#### *Projeto Aerogeofísico Complemento do Tocantins*

Após a execução do Projeto Aerogeofísico Tocantins, restou área não coberta entre este e o Estado de Goiás, a qual foi posteriormente levantada pelo Projeto Aerogeofísico Complemento do Tocantins. Este levantamento recobre uma pequena parte da



área de interesse no sul do Estado de Tocantins e também foi concebido no âmbito do Programa Geologia do Brasil – CPRM/MME, cujos dados foram cedidos ao IG-UnB.

A aquisição dos dados aerogeofísicos deste levantamento foi realizada pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções S/A, possui espaçamento de 0,5 km entre as linhas de voo, orientadas na direção Norte-Sul e 5,0 km entre as linhas de controle, orientadas na direção Leste-Oeste, com altura nominal de voo de 100 metros . De acordo com o Texto Técnico do projeto foi realizada com uma aeronave Cessna modelo C-208 B (PR-FAS) que adquiriu a totalidade dos dados entre os dias 6 de dezembro de 2006 e 12 de janeiro de 2007. Os dados foram obtidos com o gamaespectrômetro Exploranium GR-820, de 256 canais, com detectores de cristais de Iodeto de Sódio ativados a Tálcio com volume total de 2.560 polegadas cúbicas, das quais 512 são de cristais voltados para cima (*upward looking*) e o restante voltados para baixo (*downward looking*).

O magnetômetro aéreo utilizado foi o Scintrex CS-2, com sensor de vapor de Césio montado na cauda da aeronave (montagem *Stinger*), com faixa de sensibilidade de 20.000 a 100.000 nT e resolução de 0,001 nT. Foi também utilizado magnetômetro terrestre GEM GSM-19. As leituras do gamaespectrômetro foram realizadas a cada 1,0s e as do aeromagnetômetro a cada 0,1s o que, dada a velocidade aproximada de voo da aeronave PR-FAS (240 km/h), corresponde a uma medida radiométrica a cada 67 metros e uma magnetométrica a cada 6,7 metros. Aos dados magnetométricos e gamaespectrométricos do Projeto Complemento do Tocantins foram aplicadas correções e realizado pré-processamento visando adequar os dados a processamento e interpretação finais, conforme discriminado no Texto Técnico correspondente (Lasa, 2007).

### **Dados Geológicos**

Com o propósito de verificar as relações entre as unidades litológicas e suas respectivas respostas geofísicas, foram utilizados os dados geológicos obtidos do SIG Geologia do Estado de Goiás e do Distrito Federal, escala 1:500.000, cedidos pela CPRM em formato digital (Moreira *et al.*, 2008) e, para o Estado de Tocantins, foi utilizada a Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (Schobbenhaus *et al.*, 2004). Destes dados

foram, ainda, utilizadas algumas informações cartográficas gerais, como localização de cidades, rede viária e hidrografia.

## **Preparação dos Dados**

### *Dados Gamaespectrométricos*

Os dados radiométricos possuem espaçamento aproximado de 80 metros entre cada medida ao longo das linhas de vôo, que por sua vez são espaçadas entre si de 500 metros. Segundo Andrade *et al.* (1985), as mineralizações de urânio do Projeto Rio Preto estão distribuídas em pequenos corpos alongados segundo a foliação metamórfica, cujos veios mineralizados apresentam larguras menores que um metro, ou seja, com geometria de dimensões reduzidas. Assim, com o objetivo de preservar ao máximo a capacidade de detecção de alvos dos dados originais, tendo em vista que um ou dois pontos anômalos podem representar um corpo mineralizado, não foi realizada correção de *spikes*, correção de valores negativos ou normalização para a média crustal, tampouco foram os dados interpolados ou micronivelados nesta etapa de preparação para a regressão múltipla, que consistiu basicamente na análise dos dados em tabela.

Para visualização espacial de cada uma das variáveis foram também gerados os mapas dos canais eU, eTh e K, utilizando o interpolador *Bi-directional line gridding - BiGrid*, desprezando-se as linhas de controle e com célula de 125m (Cap. IV, Figs. 3a, 3b e 3c; Cap. V Figs. 3a, 3b e 4a). Todo o processamento foi realizado no programa *Geosoft Oasis Montaj 7.0.1*.

### *Dados Magnetométricos*

A amostragem dos dados de magnetometria possui espaçamento cerca de 10 vezes menor que o espaçamento amostral dos dados de gamaespectrometria. Para o procedimento de regressão foi feita, no SIG *ArcGIS*<sup>TM</sup> versão 9.3, a reamostragem desses dados para o espaçamento coincidente com os produtos de gamaespectrometria, ou seja, utilizando-se somente os dados coincidentes espacialmente. Desta forma, partir do Campo



Magnético Total (CMT) foi gerado o Campo Magnético Anômalo (CMA), pela subtração do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), conforme consta no Relatório Técnico do levantamento (Lasa, 2006). A partir dos dados preprocessados foi realizado um micronivelamento, utilizando-se o filtro passa-alta e cosseno direcional. Assim foi gerado mapa do CMA com célula de 80 metros para os dados de Goiás e de 75 metros para os dados de Tocantins, por meio do interpolador *BiGrid*. A partir do qual foi efetuado o cálculo da Amplitude do Sinal Analítico (ASA). Os dados de ASA (Cap. IV Fig. 3d e Cap. V Fig. 4b) foram exportados em formato tabular para integrar as variáveis independentes da regressão, com espaçamento amostral coincidente ao dos dados gamaespectrométricos.

### **Processamento dos Dados**

Os dados de gamaespectrometria e magnetometria foram processados no programa *Geosoft Oasis Montaj*<sup>TM</sup> versão 7.0.1, utilizando a estrutura do Laboratório de Geofísica Aplicada – LGA, do IG/UnB. A integração dos dados geofísicos com os dados geológicos e a produção de layout de mapas foi realizada no SIG *ArcGIS*<sup>TM</sup> versão 9.3, também de propriedade do LGA. A parte da área de interesse relativa ao Estado de Goiás, composta por apenas um levantamento, foi processada individualmente, enquanto a área de interesse referente ao Estado de Tocantins, composta pelos outros dois levantamentos, passou primeiramente por uma junção de dados para, em seguida, ser processada. Ou seja, os processamentos foram realizados separadamente para cada Estado, sendo explicitados em maior detalhe nos capítulos IV e V.

Conforme apresentado na Fig. 2, o fluxo de processamento adotado prezou pela mínima interferência nos dados, especialmente para os dados radiométricos, uma vez que, pelas características das mineralizações, um ou dois pontos anômalos podem corresponder a um corpo mineralizado.

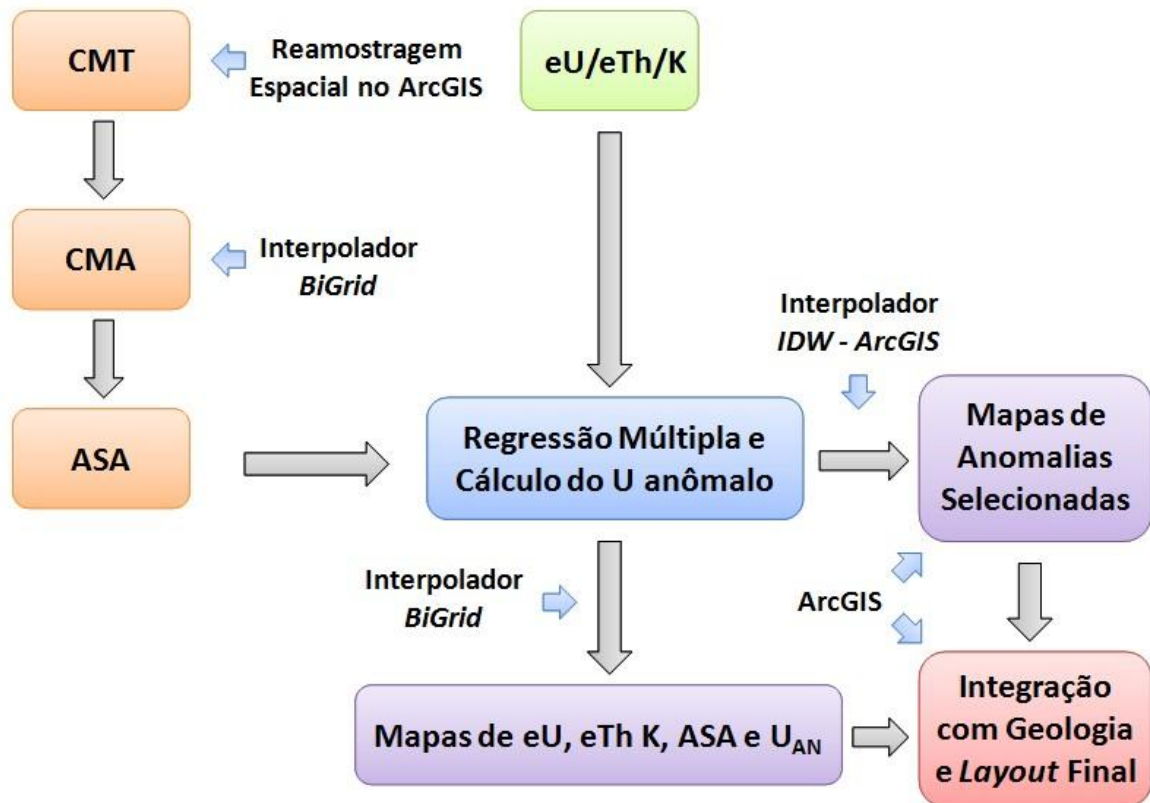


Figura 2: Fluxograma de processamento dos dados. Onde CMT = campo magnético total; CMA = campo magnético anômalo e ASA = amplitude do sinal analítico.

### Aplicação da Regressão Múltipla Linear aos Dados

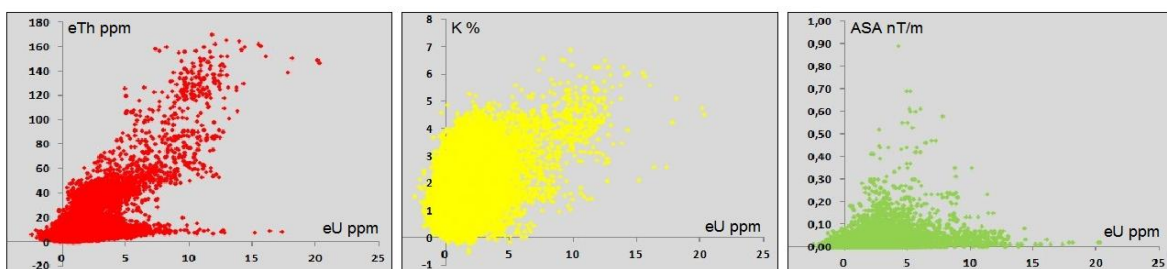
Para identificar novos alvos prospectivos de urânio na área de interesse, adotou-se uma metodologia semelhante à proposta por Pires *et al.* (2010) a fim de promover a atenuação da influência litológica sobre as concentrações de urânio observadas em aerolevantamentos e, portanto, realçar as concentrações anômalas deste radioelemento.

Para a aplicação da regressão múltipla linear aos dados utilizados neste trabalho, foram gerados dois modelos distintos: para o Estado de Goiás foram selecionados apenas os dados restritos à região do Projeto Rio Preto (Fig. 1, polígono “a”) para a geração dos coeficientes de regressão; para o Estado do Tocantins foram utilizados os dados restritos à região de ocorrência da mineralização do Alecrim (Fig. 1 polígono “b”).

Os dados de eU, eTh, K e ASA foram relacionados conforme a Eq. (1), à página 27, para determinar os coeficientes lineares a, b e c, no aplicativo *Solver Microsoft*

Excel<sup>TM</sup> versão 2007. A constante (cte) foi fixada em zero no momento de cálculo dos coeficientes, visando adequar o modelo de regressão a um modelo geológico que indique concentração nula de urânio somente na hipótese de nulidade dos outros radioelementos. Assim, para que o modelo a ser gerado seja eficiente na predição da contribuição litológica nas concentrações de urânio  $[U_{(K, Th, ASA)}]$ , deve existir significativa correlação entre a variável dependente (eU) e cada uma das variáveis independentes (eTh, K e ASA).

A Fig. 3 apresenta os gráficos de dispersão dessas variáveis para a região do Projeto Rio Preto, os quais indicam boa correlação do eU com as outras variáveis radiométricas e pouca correlação deste com a variável magnetométrica ASA. Essas relações já eram esperadas da observação dos mapas dessas variáveis na região do Projeto Rio Preto (Cap. IV Fig. 3). A análise dos gráficos permite inferir que as contribuições do eTh e do K serão maiores que a contribuição da ASA na previsão da variável dependente, o U teórico, a qual reflete as variações das concentrações de urânio em função dos diversos litotipos  $[U_{(K, Th, ASA)}]$ .



**Figura 3: Gráficos de dispersão das variáveis independentes (eTh, K e ASA) em função da variável dependente (eU).**

Os coeficientes lineares obtidos para o modelo de regressão múltipla dos dados aerogeofísicos que recobrem as áreas selecionadas do Projeto Rio Preto, para o Estado de Goiás, e da ocorrência do Alecrim, para o Estado do Tocantins, foram substituídos na Eq. (1), gerando, respectivamente, a Eq. (2) e a Eq. (3).

$$U_{(K, Th, ASA)} = 0,0645 \text{ eTh} + 0,4398 \text{ K} + 0,4996 \text{ ASA} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$U_{(K, Th, ASA)} = 0,0680 \text{ eTh} + 0,4403 \text{ K} + 0,4996 \text{ ASA} \quad (\text{Eq. 3})$$

Por meio destas equações, aplicadas às variáveis independentes observadas, determinou-se os valores correspondentes ao U teórico  $[U_{(K, Th, ASA)}]$  para as respectivas áreas



de interesse, que extrapolam os limites das áreas selecionadas para produzirem os coeficientes da regressão múltipla. Subseqüentemente, subtraiu-se o U teórico do U observado, resultando nos valores de concentrações anômalas de urânio,  $U_{AN}$ , conforme a Eq. (4):

$$U_{AN} = U_{OBS} - U_{(K, Th, ASA)} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$U_{AN}$  = Urânio Anômalo e

$U_{OBS}$  = Urânio Observado.

Os dados de U anômalo foram calculados individualmente para a área de interesse no Estado de Goiás e para a área de interesse no Estado do Tocantins, os quais devem representar as concentrações anômalas de urânio atenuadas das influências litológicas.

Segundo Landim (2000), os coeficientes de regressão obtidos para cada variável independente podem ser comparados para efetuar uma ordenação de importância na previsão da variável dependente, desde que previamente padronizados e termos de unidades de desvio padrão, conforme a Eq. (5).

$$B = b \frac{S_x}{S_y} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

$B$  = Coeficiente padronizado;

$b$  = Coeficiente não padronizado;

$S_x$  = Desvio padrão da variável independente e

$S_y$  = Desvio padrão da variável dependente.

Aplicando-se a Eq. (5) para os dados do Projeto Rio Preto foram obtidos os seguintes coeficientes padronizados:  $B_{Th} = 0,62$ ,  $B_K = 0,27$  e  $B_{ASA} = 0,01$ . Estes valores indicam alta contribuição do Th, média do K e muito baixa da ASA na previsão do U.





## Apresentação e Interpretação dos Dados

Os dados de  $U_{AN}$  foram interpolados para malha regular, com espaçamento de 75 m para Tocantins e 80 m para Goiás pelo interpolador *BiGrid*. O mapa gerado representa a distribuição espacial das concentrações anômalas de urânio atenuadas das influências litológicas. Sobre este mapa foram delineados os contornos da geologia simplificada para a região, de modo a permitir a observação de variações nas concentrações anômalas de urânio em função dos litotipos aflorantes na área de estudo.

Adicionalmente, para proceder à análise dos dados obtidos e sua integração com outros dados utilizou-se o sistema de informações geográficas *ArcGIS 9.3*. Neste programa, os valores obtidos para o  $U_{AN}$  foram plotados em mapa como pontos e interpolados para uma malha regular com células de 75 e 80 metros, respectivamente, utilizando-se a extensão *GeoStatistical Analyst*. Foi utilizado o interpolador *Inverse Distance Weighting (IDW)*, por sua característica de preservação dos valores reais nos pontos de amostragem.

Os produtos dessa interpolação foram classificados em termos do desvio padrão de suas médias, gerando planos de informação nos quais constam apenas as duas faixas superiores de concentrações do  $U_{AN}$ : a de valores intermediários, que abrange concentrações entre a média de  $U_{AN}$  mais o desvio padrão e a média mais quatro desvios padrão; e a de valores mais elevados, que engloba todos os valores superiores à primeira. Admitiu-se essa última faixa como representante de áreas com mais alta favorabilidade à ocorrência de mineralizações de urânio em superfície, a qual foi utilizada como referência para a verificação de anomalias a campo.

A interpretação dos dados assim apresentados foi feita através de seu cruzamento, em ambiente SIG, com informações geológicas e com dados espaciais extraídos de bibliografias referentes ao Projeto Rio Preto (Figueiredo Filho *et al.*, 1982) e ao Projeto Campos Belos (Andrade *et al.*, 1985). Posteriormente, procedeu-se à verificação de algumas anomalias a campo.

### **Verificação de Campo**

O levantamento de campo foi realizado entre os dias 20 e 25 de julho de 2011. Foram verificadas seis das principais anomalias selecionadas para as áreas dos projetos Rio Preto e Campos Belos, identificadas nas Figs. 5b e 5c pela sigla “cc”, além da ocorrência do Alecrim, para o Estado de Tocantins. Os valores radiométricos nessas regiões anômalas foram medidos com o gamaespectrômetro portátil RSI, modelo RS 230 BGO Super-SPEC, que com tempo de integração de 120 segundos, forneceu concentrações máximas de eU por volta de 650 ppm para as anomalias da região de Campos Belos e superiores ao limite de detecção do aparelho, ou seja, maiores que 10.000 ppm, em corpos mineralizados da região do Rio Preto. Foram encontrados diversos vestígios de antigas campanhas de pesquisa mineral, como trincheiras, valas e furos de sondagem realizados pelas empresas estatais.



## Capítulo IV

### PROSPECÇÃO DE URÂNIO NO NORDESTE DE GOIÁS:

### REGRESSÃO MÚLTIPLA APLICADA A DADOS AEROGEOFÍSICOS

---

#### Resumo

A região nordeste do estado de Goiás foi investigada pela Nuclebrás e CNEN nas décadas de 1970 e 1980 com vistas a detectar elementos radioativos, ocasião em que foram empreendidos os projetos prospectivos de urânio: Rio Preto e Campos Belos. Tais projetos identificaram mineralizações uraníferas estimadas em cerca de 1.000 toneladas de  $U_3O_8$ , consideradas de pequeno porte e, portanto, foram interrompidos os trabalhos de pesquisa. Em 2006 foi executado levantamento aerogeofísico que recobriu as áreas destes projetos com dados de gamaespectrometria e magnetometria. Dados aerogeofísicos tem sido amplamente utilizados na detecção direta de corpos mineralizados em urânio. Entretanto, para áreas de grande variabilidade litológica, a determinação de valores a serem considerados anômalos torna-se difícil, pois a concentração do elemento urânio é significativamente influenciada pelo tipo de rocha. O objetivo do presente trabalho é avaliar a técnica de regressão linear múltipla aplicada aos dados aerogeofísicos que recobrem as unidades litológicas anômalas em urânio no nordeste de Goiás, utilizando o método proposto por Pires *et al.* (2010), para atenuar a influência litológica sobre as concentrações de urânio. O resultado demonstrou a eficácia do método proposto na remoção de influências litológicas sobre os teores de urânio, realçou as ocorrências de urânio conhecidas na região e identificou novos alvos prospectivos para este radioelemento.

**Palavras chave:** Gamaespectrometria, magnetometria, realce de anomalias, Formação Ticunzal, Suíte Aurumina.

## Abstract

The northeastern state of Goiás was investigated by Nuclebrás and CNEN in the 1970s and 1980s in order to detect radioactive elements, when the following prospective uranium projects were undertaken: Rio Preto and Campos Belos. Such projects identified uranium mineralization estimated at about 1,000 tons of  $U_3O_8$ , which were considered small and, therefore, research work in the area was interrupted. In 2006, an airborne geophysical survey covered these project areas with gamma-ray spectrometry and magnetic data. Aerogeophysical data has been widely used in the direct detection of mineralized uranium bodies. However, in areas of great lithological variability, the determination of the anomalous values becomes difficult because uranium concentration is significantly influenced by the rock type. The objective of this study is to evaluate the multiple linear regression technique applied to the aerogeophysical data that cover the anomalous lithological units of uranium in northeastern Goiás, using the method proposed by Pires *et al.* (2010), to mitigate the influence of lithology on the uranium concentrations. The results demonstrate the effectiveness of the proposed method for the removal of lithological influences on the levels of uranium, highlight the known uranium occurrences in the region and identify new prospective targets for this radioelement.

**Keywords:** Gamma-ray spectrometry, magnetic, highlight of anomalies, Ticunzal Formation, Aurumina Suite.



## Introdução

A prospecção de minerais radioativos no Brasil teve seu auge nas décadas de 1970 e 1980, período em que diversos levantamentos aerogeofísicos foram realizados, especialmente por demanda de empresas ligadas ao monopólio estatal do setor de energia nuclear, como a Empresas Nucleares Brasileiras S/A – Nuclebrás, extinta em 1988 e a Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Como resultado desse esforço, foram identificadas várias ocorrências de minerais radioativos, principalmente minerais de urânio, dispersas pelo território nacional, dentre elas, algumas de significativo potencial econômico, como os depósitos de Poços de Caldas-MG, Lagoa Real-BA e Itataia-CE.

Na região nordeste do estado de Goiás, os trabalhos da CNEN e da Nuclebrás identificaram, com o auxílio de levantamentos aerogeofísicos, significativas anomalias de urânio associadas a rochas metassedimentares nos municípios de Colinas do Sul, Cavalcante e Campos Belos. Após a realização de sondagens iniciais, os prospectos foram considerados de pequeno porte e, conseqüentemente, os trabalhos foram suspensos (Andrade *et al.*, 1985). Atualmente, a demanda mundial de urânio para fins de geração de energia elétrica tem crescido, tanto em função do aumento da demanda energética global, como pela busca de alternativas à queima de combustíveis fósseis. Neste cenário o Brasil ocupa posição de destaque por possuir a 6ª maior reserva mundial de urânio, mesmo tendo prospectado apenas um quarto de seu território (Gomes *et al.*, 2003).

Este trabalho propõe a revisitação de unidades litológicas anômalas em urânio no nordeste do estado de Goiás, utilizando a técnica de regressão linear múltipla, conforme proposta por Pires *et al.* (2010), para avaliar sua eficácia e delinear novos alvos de urânio, em função da disponibilidade de novos dados aerogeofísicos para a região (Fig. 1).

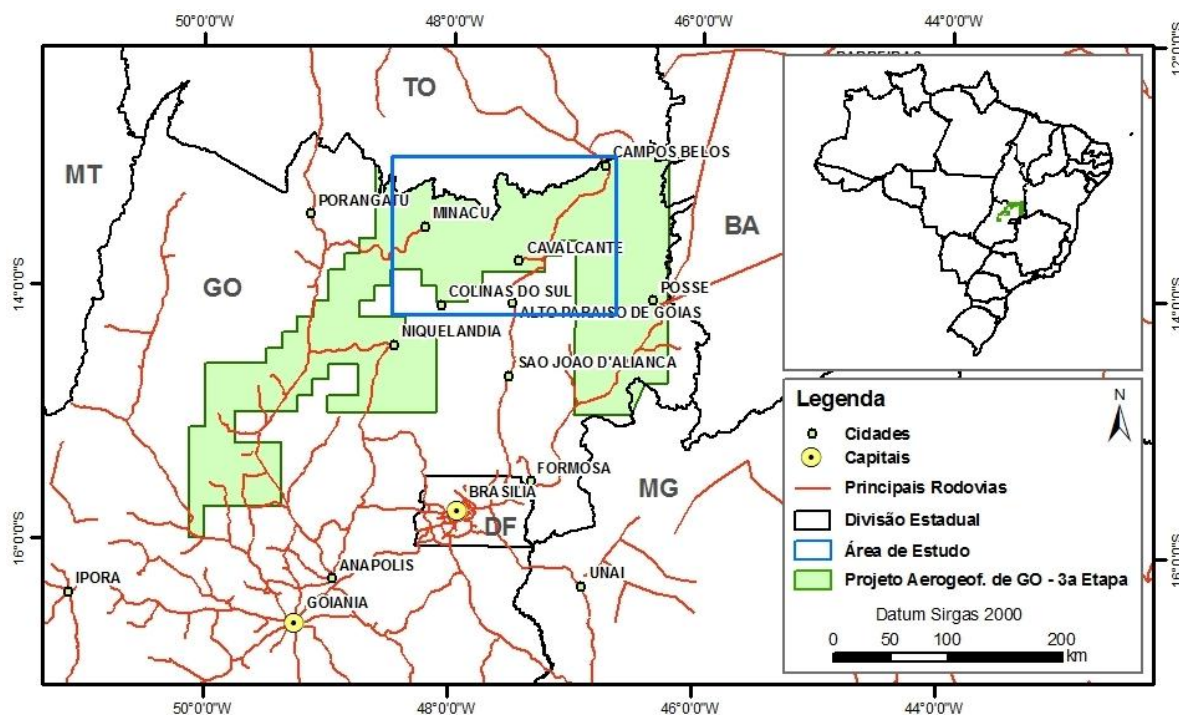
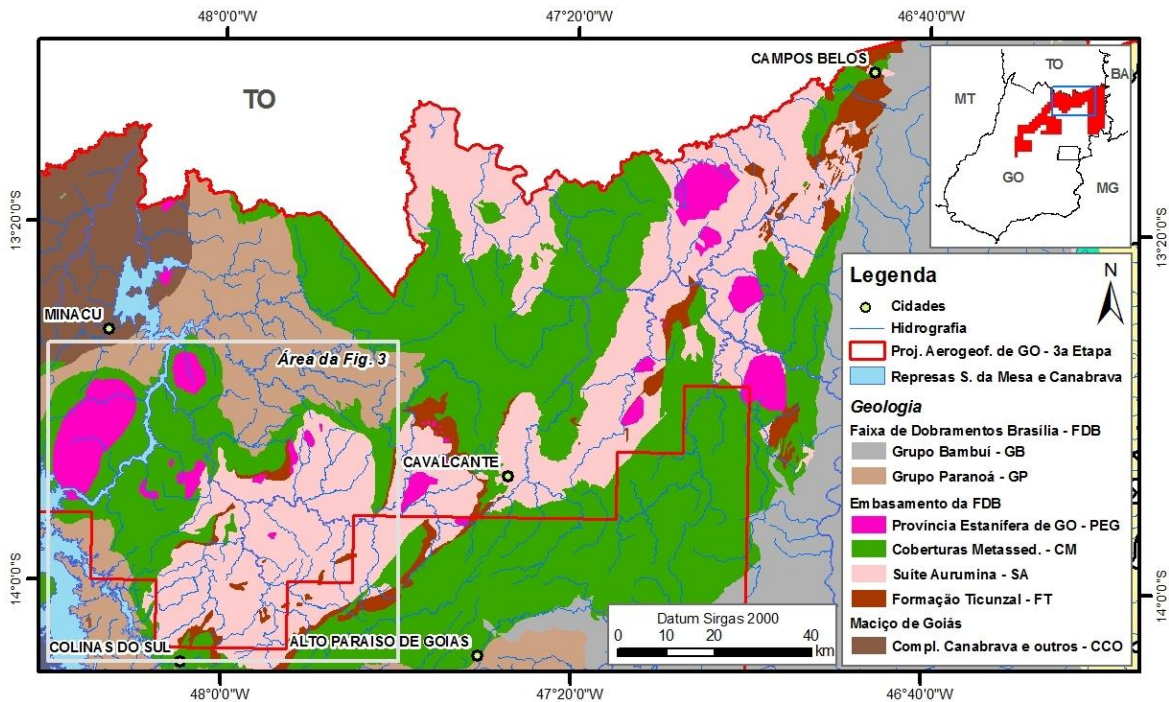


Figura 1: Mapa de localização da Área de Estudo e do levantamento aerogeofísico utilizado.

### Contexto Geológico

A região de interesse está inserida em uma das faixas móveis que integram a Província Estrutural Tocantins (Almeida *et al.*, 1977): a Faixa de Dobramentos Brasília - FDB. Segundo Fuck *et al.* (1994), a FDB abrange duas zonas com distintos padrões de metamorfismo e deformação, a Zona Interna e a Zona Externa, além do Maciço e do Arco Magmático de Goiás. A Zona Externa, com metamorfismo fácies xisto-verde a anfíbolito, bordeja longitudinalmente o limite oeste do Cráton São Francisco e compreende coberturas metassedimentares meso/neoproterozóicas extensas, como os Grupos Paranoá e Bambuí, além de exposições do embasamento em sua porção setentrional. Uma simplificação do contexto geológico, adaptada do SIG de Goiás (Moreira *et al.*, 2008), é apresentada na Fig. 2.



**Figura 2:** Mapa geológico simplificado da Área de Estudo (adaptado de Moreira *et al.* 2008). A classe Coberturas Metassedimentares – CM engloba os grupos Araí e Serra da Mesa e a classe Complexo Canabrava e outros – CCO engloba além deste, o Complexo Rio Maranhão e a Sequência Metavulcanossedimentar Palmeirópolis.

As ocorrências conhecidas de urânio no nordeste goiano (Andrade *et al.*, 1985) são encontradas nessas exposições do embasamento da FDB Setentrional, composto pelo Complexo Almas-Cavalcante e por coberturas metassedimentares paleoproterozóicas, como os Grupos Araí, Serra da Mesa e Natividade (Fig. 2). O Complexo Almas-Cavalcante foi discriminado na região de interesse em três distintas unidades geológicas: a Formação Ticunzal (Marini *et al.*, 1978), a Suíte Peraluminosa Aurumina (Botelho *et al.*, 1999) e os granitos da Província Estanífera de Goiás (Botelho, 1992). Geocronologicamente tem-se na Fm Ticunzal a unidade mais antiga, a qual é intrudida pela Suíte Aurumina de idades U/Pb entre 2,27 a 2,02 Ga obtidas em pegmatitos (Sparrenberguer & Tassinari, 1998). Tanto a Formação Ticunzal como a Suíte Aurumina foram intrudidas por Granitos Estaníferos de Goiás, que apresentam idades de 1,77 a 1,58 Ga (Pimentel *et al.*, 1999).

As mineralizações de urânio ocorrem principalmente nas rochas da Fm Ticunzal (Andrade *et al.*, 1985) e, de forma subordinada, em rochas da Suíte Aurumina, anteriormente denominada por Complexo Basal (Duarte & Bonotto, 2006). A Formação





Ticunzal, com duas unidades, é composta predominantemente por grafita-xistos, ocorrendo também paragnaisses e mica-xistos em sua unidade inferior, bem como quartzo-xistos e turmalina-xistos na unidade superior. A Suíte Aurumina é composta por granitos, geralmente milonitizados, e tonalitos peraluminosos deformados. Na região nordeste de Goiás, analogamente à Fm Ticunzal, esses granitos afloram nas porções baixas do relevo ou nas encostas dos vales tipicamente delimitados pelas escarpas quartzíticas do Grupo Araí.

### *Geofísica Aérea na Prospecção de Urânio*

Depósitos de urânio são formados em quase todos os ambientes geológicos, desde ambiente superficial, sedimentar, passando por diagenético, vulcânico, hidrotermal, metassomático, plutônico até metamórfico de alto grau (Dahlkamp 1993). A geoquímica do urânio é governada principalmente por seu estado de oxidação. O íon uranila ( $UO_2^{2+}$ ), altamente móvel sob condições oxidantes, forma mais de 40 diferentes complexos com os ânions hidroxila, carbonato, sulfato, cloreto, fosfato, fluoreto e silicato (Langmur 1978). Na maioria dos depósitos a precipitação de U decorre da interação de fluidos oxidantes ricos em complexos de urânio com materiais redutores, especialmente aqueles ricos em carbono (Cuney 2009).

Mineralizações podem ser compostas de uma vasta lista de minerais como a uraninita, a uranotorita, a uranotorianita e a uranoesferita, enquanto que em rochas não mineralizadas o urânio está presente na estrutura de minerais como zircão, monazita e alanita. Sua concentração média na crosta continental superior é de 2,7 ppm, geralmente sendo maior em rochas ácidas e menor em rochas básicas, demonstrando proporcionalidade direta ao teor de sílica (Minty, 1997). Rochas ígneas máficas possuem baixos teores médios, geralmente abaixo de 2 ppm, enquanto rochas ígneas félsicas possuem teores médios duas ou três vezes superiores. Rochas sedimentares apresentam grande variabilidade nas concentrações médias de urânio em função das diversas possibilidades de rochas-fonte, ambientes e processos de transporte e tendem a ser empobrecidas em urânio, embora possam apresentar *background* semelhante a granitos (Wilford, 2011). Dessa forma, o elemento urânio está presente nas mais diversas litologias





e sua concentração apresenta ampla variação, geralmente dependente do teor de sílica da rocha, além de ser influenciada por processos geológicos.

A prospecção de urânio é apoiada em suas propriedades radioativas em função da natureza penetrativa da radiação gama oriunda de minerais uraníferos. Dentre as formas de radioatividade, esta radiação é a menos atenuada pela matéria, o que implica em alta penetrabilidade, podendo transpassar várias centenas de metros de ar, embora não mais que 1 metro de rocha ou solo. Em outras palavras, a atenuação depende fundamentalmente da densidade do meio (Minty, 1997; Wilford, 2011).

Dados de gamaespectrometria aérea foram originalmente utilizados na exploração de urânio e, nas últimas décadas, passaram a contar com diversas outras aplicações, tais como no mapeamento geológico, na detecção direta de depósitos minerais, no monitoramento de radioatividade ambiental, na estimativa de recursos hídricos sob a forma de neve, no mapeamento de solos e no estudo de processos formadores da paisagem (Wilford & Minty, 2007). O método é fundamentado na constatação de que a quase totalidade da radiação gama detectada na superfície terrestre advém do decaimento radioativo de apenas três elementos: K, U e Th. O elemento K é detectado por meio da radiação gama emitida no decaimento do isótopo  $^{40}\text{K}$  para  $^{40}\text{Ar}$ , enquanto os elementos U e Th são detectados pela radiação emitida quando do decaimento de seus isótopos filhos, o  $^{214}\text{Bi}$  e o  $^{208}\text{Tl}$ . Uma vez que podem ocorrer desequilíbrios nas séries de decaimento de U e Th, convencionou-se utilizar a notação eU e eTh, indicando que as concentrações inferidas são equivalentes a séries em equilíbrio, o que nem sempre ocorre, especialmente para o elemento U (Minty, 1997).

Sensores instalados em aeronaves são capazes de detectar e quantificar a radiação gama emitida pelos radioelementos U, K e Th, quando em voos de baixa altura, geralmente não excedendo uma ou duas centenas de metros. Os raios-gama detectáveis são oriundos dos radioelementos presentes nos 40 cm superficiais de rocha ou solo (Wilford, 2011) e por meio do registro do número de raios-gama detectados por unidade de tempo e da faixa de energia detectada para cada raio, pode-se inferir a concentração de K, U e Th na área recoberta pelo sensor, subjacente à aeronave. Assim, a técnica de gamaespectrometria aérea vem sendo utilizada na prospecção de urânio, especialmente em



áreas extensas, de grande geodiversidade, muitas vezes inacessíveis por via terrestre, permitindo a coleta de dados estimativos da concentração desse radioelemento nas rochas aflorantes e solos. Entretanto, como mencionado anteriormente, o estabelecimento de uma concentração de urânio para delinear anomalias geofísicas em área de grande diversidade litológica torna-se uma tarefa difícil, uma vez que teores anômalos para uma litologia frequentemente representam teores de *background* para outras litologias.

## Material

Foram utilizados os dados de gamaespectrometria e magnetometria do Projeto Aerogeofísico do Estado de Goiás – 3ª Etapa (Fig. 1), denominado Paleo-Neoproterozóico de Goiás (também conhecido como Área V), concebido no âmbito de convênio entre o Governo Federal, por meio da CPRM e do Ministério de Minas e Energia, e o Governo de Goiás, por meio da Secretaria de Indústria e Comércio e do Funmineral.

O levantamento foi realizado pela Lasa Engenharia e Prospecções S/A em 2006 e possui espaçamento de 0,5 km entre as linhas de vôo, orientadas na direção Norte-Sul e 5,0 km entre as linhas de controle, orientadas na direção Leste-Oeste, com altura nominal de vôo de 100 metros. De acordo com o Relatório Técnico do projeto (Lasa, 2006), o levantamento de dados contou com duas aeronaves em sua execução, um Cessna 404 Titan (PT-FZN), que sobrevoou a porção oeste entre 1º de maio e 10 de julho de 2006, e um Piper Navajo PA31 (PT-WOT), que sobrevoou a porção leste entre 8 de junho e 1º de setembro de 2006. Os dados utilizados neste estudo foram obtidos exclusivamente pela aeronave de prefixo PT-WOT, com o gamaespectrômetro Exploranium GR-820, de 256 canais, com detectores de cristais de Iodeto de Sódio ativados a Tálcio com volume total de 2.560 polegadas cúbicas, das quais 512 são de cristais voltados para cima (*upward looking*) e o restante de cristais voltados para baixo (*downward looking*).

O magnetômetro aéreo utilizado foi o Scintrex CS-2, com sensor de vapor de Césio montado na cauda da aeronave (montagem Stinger), com faixa de sensibilidade de 20.000 a 95.000 nT e resolução de 0,001 nT. Foi também utilizado magnetômetro terrestre Overhauser GEM GSM-19. As leituras do gamaespectrômetro foram realizadas a cada 1,0 s e do magnetômetro a cada 0,1 s o que, dada a velocidade aproximada de voo da

aeronave PT-WOT (287 km/h), corresponde a uma medida a cada 80 metros e 8 metros, respectivamente. Aos dados magnetométricos e gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico do Estado de Goiás - 3ª Etapa foram aplicadas correções e realizado pré-processamento visando adequar os dados a processamento e interpretação finais, conforme discriminado no Relatório Técnico correspondente (Lasa, 2006).

## **Método**

O método proposto consiste na aplicação da técnica de regressão linear múltipla aos dados da 3ª Etapa do Projeto Aerogeofísico do Estado de Goiás, que recobriu as áreas prospectadas pela Nuclebrás e CNEN no final da década de 1970 e início da década de 1980 no nordeste do Estado. Neste trabalho propõe-se realçar as concentrações anômalas de U presentes nos diversos litotipos seguindo a metodologia proposta por Pires *et al.* (2010), a qual é fundamentada na correlação entre as concentrações ambientais dos radioelementos K, U e Th, e na variação dessas concentrações de acordo com os diferentes litotipos.

Segundo Pires (1995), o Th é considerado um bom mapeador litológico em função de sua pouca mobilidade no ambiente superficial. Já o elemento K, embora apresente maior mobilidade sob as mesmas condições, é um importante elemento maior constituinte de minerais formadores de rochas e, deste modo, indica a variação dos litotipos em superfície (IAEA, 2003). Destarte, as concentrações superficiais de Th e K podem ser utilizadas para prever a contribuição litológica do U, uma vez que este, por sua vez, possua alguma correlação com aqueles radioelementos. Adicionalmente, Pires *et al.* (2010) também utiliza como variável independente o produto magnetométrico Amplitude do Sinal Analítico (ASA) para caracterizar a distribuição superficial de litotipos, baseando-se no princípio de que em baixas e médias latitudes este produto se ajusta aos limites de unidades magnéticas, ressalvando-se que essas unidades nem sempre são aflorantes. Deste modo, o trabalho de Pires *et al.* (2010) utilizou a Eq. (1) para relacionar de maneira linear essas variáveis independentes a teores de urânio que devem refletir a flutuação intrínseca à variação litológica:



$$U_{(K, Th, ASA)} = cte + aK + bTh + cASA \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$U_{(K, Th, ASA)}$  = concentração teórica de urânio em função das concentrações de potássio, tório e da amplitude do sinal analítico;

$cte$  = constante e

$a$ ,  $b$  e  $c$  = coeficientes de regressão linear para K, Th e ASA, respectivamente.

A partir da Eq. (1) procede-se à determinação dos coeficientes de regressão linear utilizando-se os canais dos três radioelementos e da ASA observados. Este trabalho utilizou as mesmas variáveis que o trabalho de Pires *et al.* (2010), porém sem proceder à normalização prévia destas. Foi, ainda, utilizado um algoritmo distinto para o cálculo dos coeficientes da regressão (*Solver Excel*), o que permitiu considerar nulo o valor da constante. Em seguida, os coeficientes foram utilizados no cálculo de uma concentração teórica do elemento urânio ( $U$  teórico), de notação  $U_{(K, Th, ASA)}$  que, para este modelo, deve representar a variação da concentração de  $U$  nas diferentes rochas. Por fim, o  $U_{(K, Th, ASA)}$  é subtraído do canal do  $U$  observado, gerando uma nova concentração de urânio, teoricamente com significativa atenuação da influência litológica ( $U$  anômalo).

A área correspondente ao prospecto de urânio do Projeto Rio Preto foi recortada do levantamento original e os dados gamaespectrométricos e magnetométricos desta foram utilizados no modelo de regressão múltipla. A partir dos coeficientes determinados para essa área foi calculado o  $U$  teórico para toda a área de estudo.

#### *Preparação dos Dados Gamaespectrométricos*

Os dados radiométricos possuem espaçamento aproximado de 80 metros entre cada medida ao longo das linhas de voo, que por sua vez são espaçadas a cada de 500 metros. Segundo Andrade *et al.* (1985), as mineralizações de urânio do Projeto Rio Preto estão distribuídas em pequenos corpos alongados segundo a foliação metamórfica, cujos veios mineralizados apresentam larguras menores que um metro, ou seja, com geometria



de dimensões reduzidas . Assim, com o objetivo de preservar ao máximo a capacidade de detecção de alvos dos dados originais, tendo em vista que um ou dois pontos anômalos podem representar um corpo mineralizado, não foi realizada correção de *spikes*, correção de valores negativos ou normalização para a média crustal, tampouco foram os dados interpolados ou micronivelados nesta etapa de preparação para a regressão múltipla, que consistiu basicamente na análise dos dados em tabela e perfil.

Para efeitos comparativos, foi feita uma duplicata dos dados, à qual foram aplicadas as correções habituais citadas. Para este segundo grupo de dados foram gerados mapas dos canais eU, eTh e K utilizando o interpolador *Bi-directional line gridding - BiGrid*, desprezando-se as linhas de controle e com célula de 125 m (Figs. 3a, 3b e 3c). Todo o processamento foi realizado no programa *Geosoft Oasis Montaj 7.0.1*.



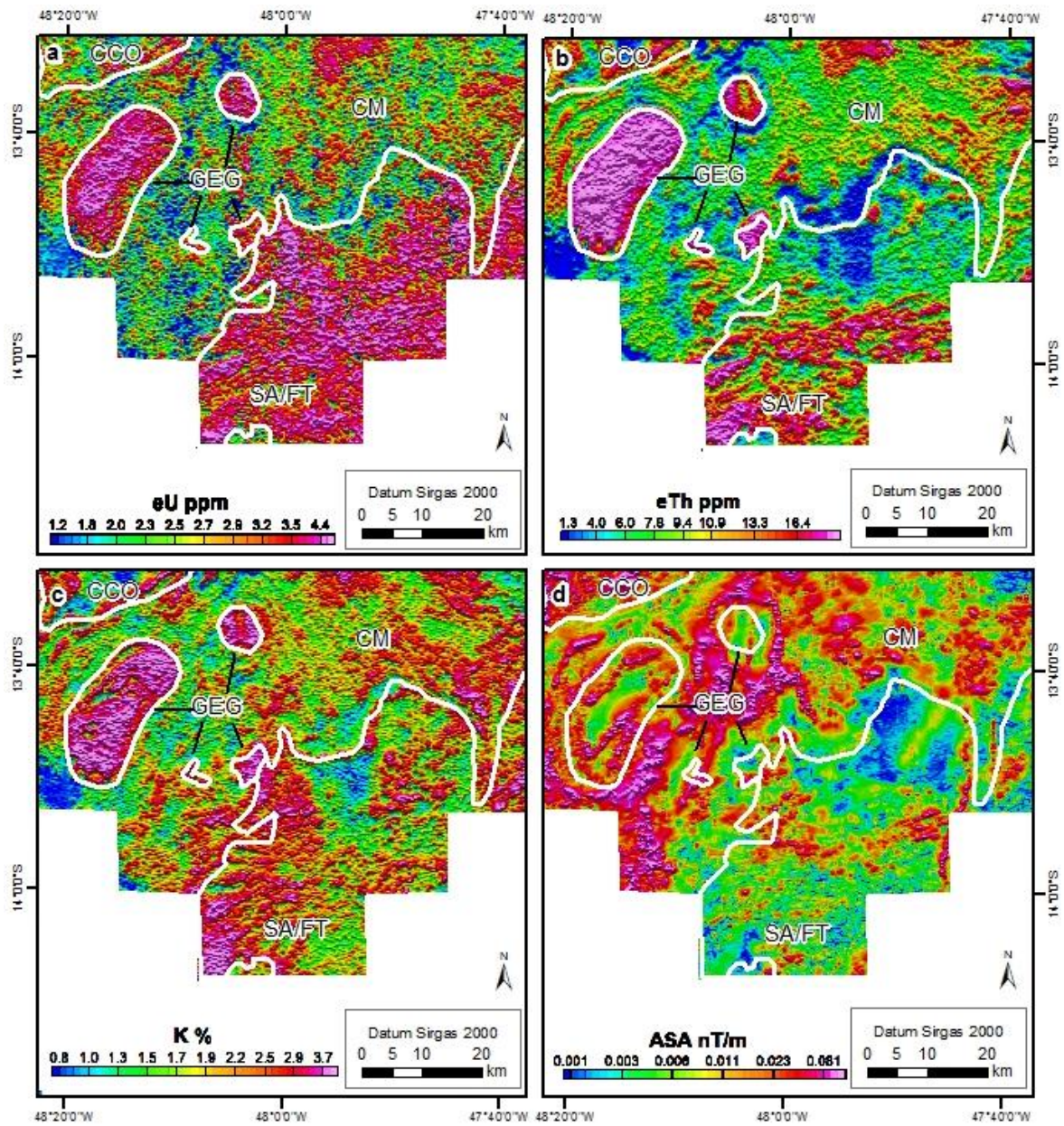


Figura 3: Mapas dos produtos aerogeofísicos utilizados no modelo de regressão linear, onde a – Mapa de eU; b – Mapa de eTh; c – Mapa de K; d – Mapa de ASA. SA/FT = Suíte Aurumina/Fm Ticunzal; CM = Coberturas Metassedimentares; GEG = Granitos Estaníferos de Goiás; CCO = Complexo Canabrava e Outros.

### *Preparação dos Dados Magnetométricos*

Os dados de magnetometria possuem espaçamento de 8 metros, ou seja, 10 vezes menor que o espaçamento dos dados de gamaespectrometria. Para o procedimento de regressão foi feita reamostragem para 80 metros, utilizando-se somente os dados coincidentes espacialmente com os dados de gamaespectrometria. A partir do Campo Magnético Total (CMT) foi gerado o Campo Magnético Anômalo (CMA), pela subtração do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*). Em seguida foi gerada malha regular com célula de 80 metros por meio do interpolador *BiGrid*. Também foi aplicado micronivelamento, utilizando-se o filtro passa-alta Cosseno Direcional, antes de efetuar-se o cálculo da Amplitude do Sinal Analítico (ASA). Os dados de ASA (Fig. 3d) coincidentes com o espaçamento amostral dos dados gamaespectrométricos, foram exportados em formato tabular para integrar as variáveis independentes da regressão.

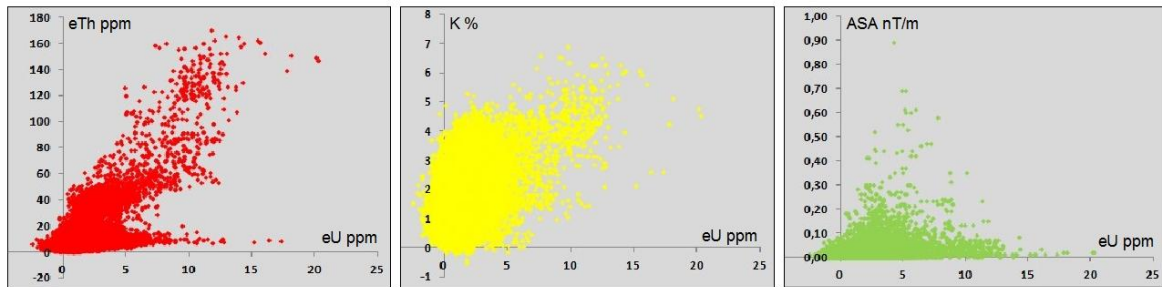
### *Regressão Múltipla Linear dos Dados*

Segundo Pires *et al.* (2010) a técnica de regressão múltipla linear entre as concentrações estimadas de radioelementos pode ser usada para modelar e remover os efeitos de processos geológicos dentro de diferentes litotipos. O método é útil na remoção de mudanças sistemáticas grosseiras nessas concentrações e também pode ser utilizado para realçar valores discrepantes da distribuição média de teores dentro de uma unidade (Pires, 1995). O procedimento consiste na geração de um modelo linear de regressão com múltiplas variáveis independentes e apenas uma variável dependente. Teoricamente, o modelo gerado permite inferir a contribuição das variáveis independentes na formação ou construção da variável dependente.

Conforme citado anteriormente, o modelo de regressão múltipla utilizado neste trabalho foi obtido a partir dos dados aerogeofísicos restritos à área do Projeto Rio Preto (Fig. 3). Os dados de eU, eTh, K e ASA foram relacionados conforme a Eq. (1) para determinar os coeficientes lineares a, b e c, no aplicativo *Solver Microsoft Excel*. Para que o modelo a ser gerado seja eficiente na predição da contribuição litológica nas

concentrações de urânio [ $U_{(K, Th, ASA)}$ ], deve existir significativa correlação entre a variável dependente (eU) e cada uma das variáveis independentes (eTh, K e ASA).

A Fig. 4 apresenta os gráficos de dispersão dessas variáveis, os quais indicam boa correlação do eU com as outras variáveis radiométricas (K e eTh) e com a variável magnetométrica ASA. Essas relações já eram esperadas a partir da observação dos mapas na região do Projeto Rio Preto (Fig. 3). A análise dos gráficos permite inferir que as contribuições do eTh e do K serão maiores que a contribuição da ASA na previsão da variável dependente, o U teórico, a qual reflete as variações das concentrações de urânio em função dos diversos litotipos [ $U_{(K, Th, ASA)}$ ].



**Figura 4: Gráficos de dispersão das variáveis independentes (eTh, K e ASA) em função da variável dependente (eU).**

Os coeficientes lineares obtidos para o modelo de regressão múltipla dos dados aerogeofísicos que recobrem a área do Projeto Rio Preto foram substituídos na Eq. (1), gerando a Eq. (2).

$$U_{(K, Th, ASA)} = 0,0645 eTh + 0,4398 K + 0,4996 ASA \quad (\text{Eq. 2})$$

Por meio desta equação, aplicada às variáveis independentes observadas, determinou-se os valores correspondentes ao U teórico [ $U_{(K, Th, ASA)}$ ] para toda a área de estudo, extrapolando os limites do Projeto Rio Preto e recobrindo também a área do Projeto Campos Belos.

Subseqüentemente, subtraiu-se o U teórico do U observado, resultando nos valores de concentrações anômalas de urânio, U anômalo, conforme a Eq. (3):

$$U_{AN} = U_{OBS} - U_{(K, Th, ASA)} \quad (\text{Eq. 3})$$





Onde:

$U_{AN}$  = Urânio Anômalo e

$U_{OBS}$  = Urânio Observado.

Os dados de U anômalo foram calculados para toda a área de trabalho e representam as concentrações anômalas de urânio atenuadas das influências litológicas.

#### *Apresentação e Interpretação dos Dados*

O mapa de U anômalo foi obtido pelo interpolador *BiGrid*, com célula de 80m, para toda a área de trabalho e é apresentado na Fig. 5a. Este mapa representa a distribuição espacial das concentrações anômalas de urânio atenuadas das influências litológicas. Sobre este mapa foram delineados os contornos da geologia simplificada para a região, de modo a permitir a observação de variações nas concentrações anômalas de urânio em função dos litotipos aflorantes na área de estudo.

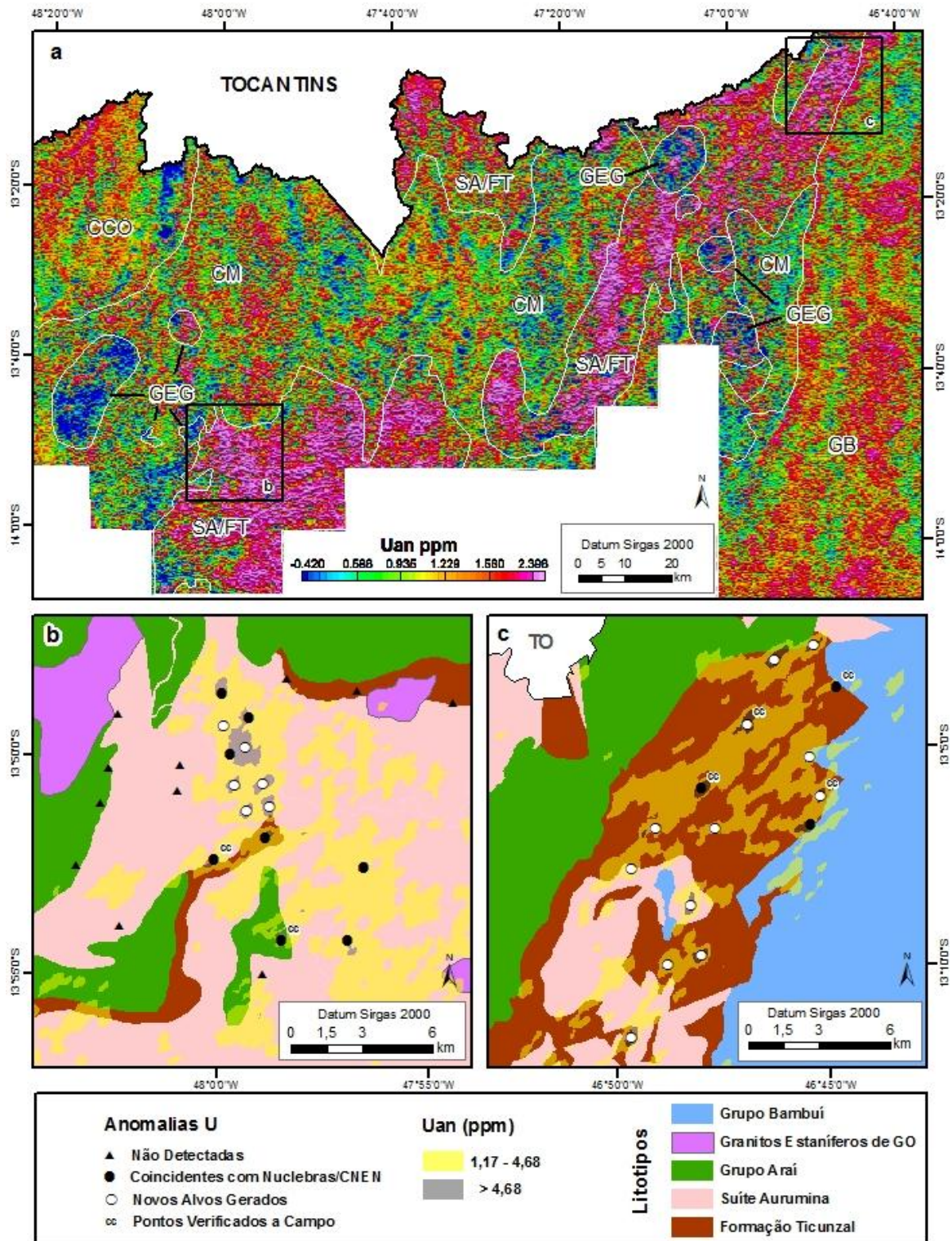


Figura 5: a) Mapa de Uan para a Área de Estudo, onde: SA/FT = Suíte Aurumina/Fm Ticunzal; CM = Coberturas Metassedimentares; GEG = Granitos Estaníferos de Goiás; GB = Grupo Bambuí; CCO = Complexo Canabrava e outros. b) e c) Mapas geológicos das áreas dos projetos Rio Preto e Campos Belos, respectivamente, com regiões de urânio anômalo e as anomalias de U selecionadas.



Adicionalmente, para proceder à análise dos dados obtidos e sua integração com outros dados utilizou-se o sistema de informações geográficas *ArcGIS 9.3*. Neste programa, os valores obtidos para o  $U_{AN}$  foram plotados em mapa como pontos e interpolados para uma malha regular com célula de 80 metros utilizando-se a extensão *GeoStatistical Analyst*. Foi utilizado o interpolador *Inverse Distance Weighting (IDW)*, por sua característica de preservação dos valores reais nos pontos de amostragem.

O produto dessa interpolação foi classificado em termos de seu desvio padrão, gerando plano de informação no qual constam apenas as duas faixas superiores de concentrações do  $U_{AN}$ : a de valores intermediários, que abrange concentrações entre a média de  $U_{AN}$  mais o desvio padrão e a média mais quatro desvios padrão, ou seja, entre 1,17 e 4,68 ppm. E a de valores mais elevados, que engloba todos os valores superiores à primeira, ou seja, superiores a 4,68 ppm de  $U_{AN}$ . Admitiu-se essa última faixa como representante de áreas com mais alta favorabilidade à ocorrência de mineralizações de urânio em superfície, a qual foi utilizada como referência para a verificação de anomalias a campo.

A interpretação dos dados assim apresentados foi feita através de seu cruzamento, em ambiente SIG, com informações geológicas e com dados espaciais extraídos de bibliografias referentes ao Projeto Rio Preto (Figueiredo Filho *et al.*, 1982) e ao Projeto Campos Belos (Andrade *et al.*, 1985). Posteriormente, procedeu-se à verificação de algumas anomalias a campo.

#### *Verificação de Campo*

O levantamento de campo foi realizado entre os dias 20 e 25 de julho de 2011. Foram verificadas seis das principais anomalias selecionadas para as áreas dos projetos Rio Preto e Campos Belos (Figs. 5b e 5c). Os valores radiométricos nessas regiões anômalas foram medidos com o gamaespectrômetro portátil RSI, modelo RS 230 BGO Super-SPEC que, com tempo de integração de 120 segundos, forneceu concentrações máximas de eU por volta de 650 ppm para as anomalias da região de Campos Belos e superiores ao limite de detecção do aparelho, ou seja, maiores que 10.000 ppm, em corpos mineralizados da região do Rio Preto. Foram encontrados diversos vestígios de antigas

campanhas de pesquisa mineral, como trincheiras, valas e furos de sondagem realizados pela Nuclebrás e CNEN.

## **Resultados e Discussão**

Como resultados da metodologia empregada foram obtidos os mapas referentes às variáveis utilizadas na regressão múltipla (Fig. 3) e o produto final do modelo de regressão múltipla, o mapa de U anômalo (Fig. 5a). Este último produto foi ainda trabalhado em SIG, conforme descrito na metodologia, para definir as áreas de maior favorabilidade à ocorrência de mineralizações uraníferas nas áreas dos projetos Rio Preto e Campos Belos (Figs. 5b e 5c, respectivamente), direcionando os trabalhos de verificação de campo e possibilitando sua integração com dados geológicos.

Aos produtos geofísicos (Figs. 3 e 5a) foi sobreposta a simplificação da geologia regional (linha branca), o que permite visualizar a variação das assinaturas geofísicas de acordo com os distintos litotipos. Para os mapas geológicos das áreas dos Projetos Rio Preto e Campos Belos as faixas de concentrações para o U anômalo foram sobrepostas em transparência (Figs. 5b e 5c).

Para o mapa do Urânio equivalente (eU), Fig. 3a, conforme esperado, tem-se concentrações elevadas, acima de 3,5 ppm, na região de afloramento da Suíte Aurumina (SA) e da Formação Ticunzal (FT), no quadrante sudeste do mapa. Entretanto, também ocorrem concentrações acima de 3,5 ppm nos Granitos Estaníferos de Goiás (GEG), representados no mapa pelos maciços Serra da Mesa, Serra Branca, Chapada de São Roque e Florêncio, do maior para o menor respectivamente. As Coberturas Metassedimentares (CM) apresentam distribuição espacial heterogênea das concentrações de urânio, porém com concentrações médias muito inferiores quando comparadas aos litotipos descritos anteriormente. Observa-se que existem algumas concentrações um pouco mais elevadas nas CM em áreas restritas e de pequenas dimensões.

No mapa de Tório equivalente (eTh), Fig. 3b, são observadas concentrações acima de 15,0 ppm associadas aos Granitos Estaníferos, o que permite a nítida definição dos contornos dessas intrusões em superfície. Na porção sul da área de afloramento da



SA/FT, também é observável uma região de alto tório ( $>12,0$  ppm), possivelmente associada a algumas intrusões da SA. O padrão de distribuição do tório para as CM revela-se muito semelhante ao do urânio, com alguns altos locais no quadrante nordeste do mapa.

Para o canal do potássio (K), Fig. 3c, mais uma vez os Granitos Estaníferos apresentaram altas concentrações ( $>3,0$  ppm), enquanto os padrões das CM e da SA e FT mostram-se semelhantes. Existe uma região significativa com alto potássio no sudoeste da região de afloramento da SA/FT.

O mapa da Amplitude do Sinal Analítico, Fig. 3d, apresenta pouca relação com as formas dos litotipos aflorantes. Nota-se a escassez de unidades magnéticas na região da SA/FT, que são um pouco mais frequentes na região das CM, especialmente nas proximidades com os Granitos Estaníferos.

O produto da aplicação do modelo de regressão múltipla linear gerou o mapa de  $U_{AN}$  (Fig. 5a), produto final da metodologia empregada, com células de 80m. Esse mapa apresenta a distribuição espacial das concentrações estimadas de U anômalo para toda a área de estudo, que recobre os projetos Rio Preto e Campos Belos.

Na Fig. 5a é possível observar que os Granitos Estaníferos de Goiás representam baixos valores de concentração do elemento U, situação oposta à verificada no mapa do U equivalente (eU) relativo à região do Projeto Rio Preto (Fig. 3a). Embora esses corpos graníticos tenham apresentado padrão inverso ao observado no canal do U, ou seja, passaram a representar anomalias negativas, a maioria deles ainda possui altos radiométricos localizados para o U. Provavelmente estes altos resquiciais refletem concentrações anômalas de U no interior dos maciços graníticos ou podem, ainda, representar apenas coberturas lateríticas superficiais que sofreram enriquecimento a partir de processos intempéricos.

As Coberturas Metassedimentares, grupos Serra da Mesa, Araí e Paranoá, continuam apresentando padrão heterogêneo na comparação com o mapa do eU, com médias intermediárias entre os GEG e as regiões de afloramento das SA/FT. Continuam apresentando, também, alguns altos locais de distribuição aleatória.





As regiões do mapa referentes aos afloramentos das SA/FT apresentam as mais altas concentrações médias do produto  $U_{AN}$  (Fig. 5a). As regiões dos projetos Rio Preto e Campos Belos foram realçadas, evidenciando concentrações anômalas superiores a 2 ppm de  $U_{AN}$  distribuídas por quase toda a extensão desses litotipos. Além das regiões dos prospectos foi realçada uma região de fortes anomalias positivas de  $U_{AN}$  entre os meridianos 47°00'W e 47°30'W (Fig. 5a).

Os extremos leste e noroeste do mapa da Fig. 5a apresentam litotipos que fogem à área de estudo do presente trabalho, denominados por GB, Grupo Bambuí e CCO, Complexo Canabrava e outros, respectivamente (Fig. 2). Estes litotipos são amplamente recobertos por solos e apresentam padrão geofísico semelhante ao das CM.

As Figs. 5b e 5c apresentam mapas geológicos para evidenciar os principais litotipos aflorantes nas áreas dos projetos Rio Preto e Campos Belos, respectivamente. Uma reclassificação do mapa de  $U_{AN}$ , na qual apenas duas classes de concentrações anômalas são representadas, é sobreposta ao mapa geológico. A primeira classe corresponde ao intervalo localizado entre a média mais o desvio padrão e a média mais quatro desvios padrão do  $U$  anômalo (polígono amarelo nas figuras 5b, e 5c) e a segunda classe corresponde aos valores superiores a esse (Figs. 5b e 5c). Também estão incluídos nessas figuras os pontos correspondentes às principais anomalias gamaespectrométricas terrestres detectadas pelos trabalhos da Nuclebrás e CNEN nas décadas de 1970 e 1980 (círculos e triângulos pretos, Figs. 5b e 5c), cabe ressaltar que existem erros intrínsecos ao processo de georreferenciamento. As simbologias nas figuras 5b e 5c fazem menção às coincidências entre essas anomalias terrestres e as anomalias aéreas obtidas neste trabalho. Os resultados do processamento e do trabalho de campo, apresentados nestas figuras, revelaram novos alvos para pesquisa futura, identificados pelos círculos brancos.

Para a área correspondente ao Projeto Rio Preto (Fig. 5b) as maiores concentrações anômalas estão localizadas na região central, relacionadas a rochas da Suíte Aurumina e da Formação Ticunzal, com oito coincidências com as anomalias terrestres registradas anteriormente e seis significativas anomalias ainda inéditas. Várias anomalias terrestres relatadas nos documentos da Nuclebrás não foram detectadas pelos dados aerogeofísicos. Tais anomalias ocorrem na área periférica do Projeto, próximas às escarpas



quartzíticas do Grupo Araí, o que pode justificar sua não detecção, uma vez que nestas regiões predomina alto gradiente topográfico, o que obriga a aeronave a realizar voos mais altos.

Para a área correspondente ao Projeto Campos Belos (Fig. 5c) as maiores anomalias ocorrem de forma dispersa ao longo de um *trend* nordeste, restringindo-se a rochas da Formação Ticunzal. Em relação às anomalias terrestres do Projeto Campos Belos foram identificadas três coincidências com as anomalias aéreas detectadas neste trabalho, além de doze anomalias significativas não descritas anteriormente.

## Conclusões

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que a metodologia utilizada é eficaz na atenuação de influências litológicas sobre as concentrações de urânio obtidas por levantamentos aéreos. Prova disso é a atenuação observada nos teores de U dos Granitos Estaníferos de Goiás na comparação feita entre o mapa de eU (Fig. 4a) e o mapa do urânio anômalo (Fig. 5a), que demonstra a remoção do *background* elevado em urânio dessas litologias.

Por outro lado, os teores de U nas litologias reconhecidamente anômalas, Suíte Aurumina e Formação Ticunzal, foram realçados com a aplicação da regressão múltipla linear, o que permitiu concluir também pela aplicabilidade da técnica no realce de teores anômalos de urânio dentro de um mesmo litotipo.

Ademais, a identificação de anomalias aéreas correlacionáveis às anomalias terrestres dos trabalhos prospectivos da Nuclebrás e CNEN demonstra a potencialidade da metodologia adotada em identificar ocorrências de corpos mineralizados em U na região.

Os resultados deste trabalho também revelaram a existência de significativas anomalias em regiões não pertencentes às áreas prospectadas pelos projetos Rio Preto e Campos Belos, que se mostram favoráveis à execução de pesquisas exploratórias de maior detalhe.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Governo de Goiás/SIC/Funmineral, pela cessão dos dados aerogeofísicos utilizados.

## Referências Bibliográficas

ALMEIDA FFM, HASUI Y, BRITO NEVES BB & FUCK RA. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras *In*: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, Campina Grande, *Anais*, 363-391.

ANDRADE SM, LIBERAL GS & SANTOS FILHO JL. 1985. Depósitos de urânio de Campos Belos e Rio Preto – Goiás. *In*: C. Schobbenhaus Filho (coord.) *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, Rio de Janeiro: DNPM. v.1, p.:169 – 175;

BOTELHO NF. 1992. Les ensembles granitiques subalcalins a peralumineux mineralisés en Sn et In de la Sous-Province Paranã, État de Goiás, Brésil. Tese de doutorado. Université Pierre et Marie Curie, LISE / CNRS, França.

BOTELHO NF, ALVARENGA CS, MENESES PR & D'EL REY LH. 1999. Suíte Aurumina: Uma Suíte de Granitos Paleoproterozóicos, Peraluminosos e Sin-tectônicos na Faixa Brasília. *In*: SBG, VII Simpósio de Geologia do Centro-Oeste e X Simpósio de Geologia de Minas Gerais, *Anais*, p. 17.

CUNEY M. 2009. The extreme diversity of uranium deposits. *In*: *Miner Deposita* (2009) 44:3-9. Springer-Verlag, 2009.

DAHLKAMP FJ. 1993. Uranium ore deposits. Springer, Berlin, p. 460.

DUARTE CR & BONOTTO DM. 2006. Gamaespectrometria Aplicada ao Projeto Rio Preto (GO). *Geochimica Brasiliensis*, 20: 278-294;

FIGUEIREDO FILHO, P. M. *et alii*. 1982. Projeto Rio Preto – Relatório Final. Nuclebrás/SUPPM/EGOLPM (Relatório interno).



FUCK RA, PIMENTEL MM & D'EL-REY SILVA LJH. 1994. Compartimentação Tectônica na porção oriental da Província Tocantins. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Balneário de Camboriú. *Anais*, 1: 215-216.

GOMES AJP, CRUZ PR & BORGES LP. 2003. Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio. *In*: L. A. BIZZI, C. SCHOBENHAUS, R. M. VIDOTTI & J. H. GONÇALVES (eds.) *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, Brasília: CPRM, Brasília, p.: 577-628.

IAEA - International Atomic Energy Agency. 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometric data, International Atomic Energy Agency, Viena.

LANGMUIR, D. 1978. Uranium solution–mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochim Cosmochim Acta* 42:547–569.

LASA 2006. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos - Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás - 3ª Etapa. CONVÊNIO SGM / MME / CPRM - SIC / SGM / FUNMINERAL. 138p.

MARINI OJ, LIBERAL GS, REIS LT, TRINDADE CAH & SOUZA SL. 1978. Nova unidade litoestratigráfica do Pré-cambriano do Estado de Goiás. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife. *Anais*, Recife, p. 126;

MINTY BRS. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 39-50.

MOREIRA MLO, MORETON LC, ARAÚJO VA, LACERDA JV & COSTA HF. 2008. Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC – FUNMINERAL. 141p.

PIMENTEL MM, FUCK RA, BOTELHO NF. 1999. Granites and the geodynamic history of the neoproterozoic Brasília belt, Central Brazil: a review. *Lithos*, 46: 463-483.

PIRES ACB. 1995. Identificação Geofísica de Áreas de Alteração Hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, S. Paulo, 25 (1): 61-68.

PIRES ACB, VIDOTTI RM & CARMELO AC. 2010. Realce de anomalias de urânio por regressão múltipla em levantamento aerogeofísico no sudeste de Goiás. In: SBGF, IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. Anais.

SPARREBERGER I & TASSINARI CCG. 1998. Idade da mineralização estanífera da Subprovíncia do Paraná (GO) através de datações U-Pb em cassiterita. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, Anais, Resumos, 143.

WILFORD J & MINTY B. 2007. The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes. In: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), *Digital Soil Mapping an Introductory Perspective*. Developments in Soil Science, 31. Elsevier.

WILFORD J. 2011. A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. *Geoderma* (2011), doi:10.1016/j.geoderma.2010.12.022.



## Capítulo V

### **PROSPECÇÃO DE URÂNIO NO SUDESTE DE TOCANTINS: REGRESSÃO MÚLTIPLA APLICADA A DADOS AEROGEOFÍSICOS**

---

#### **Introdução**

Os projetos Campos Belos e Rio Preto identificaram ocorrências de U no nordeste do Estado de Goiás (Andrade *et al.*, 1985). Com base nisso e no fato de as unidades geológicas aflorantes nesta região se estenderem ao Estado de Tocantins, o presente estudo apresenta os resultados da aplicação da técnica de Regressão Múltipla Linear à região sudeste deste último Estado. O mapeamento geológico disponível que recobre toda a área (Schobbenhaus *et al.*, 2004) não apresenta escala adequada à diferenciação detalhada das unidades aflorantes. Recentemente, alguns trabalhos sistemáticos de mapeamentos mais detalhados vêm sendo empreendidos no sul de Tocantins, notadamente pela CPRM e UnB.

O Projeto Jaú do Tocantins, mapeamento geológico empreendido pelo Instituto de Geociências da UnB em 2007, levantou a possibilidade de correlação entre xistos da unidade basal do Grupo Serra da Mesa e a Formação Ticunzal e entre o embasamento deste Grupo e a Suíte Aurumina (Paixão & Oliveira, 2007). Anteriormente, Marini *et al.* (1984) já havia proposto a correlação entre os Grupos Serra da Mesa e Araí, o que permitiria correlacionar a coluna estratigráfica das regiões de afloramento deste Grupo em Goiás, mais a leste da Província Tocantins, com a coluna estratigráfica daquele, aflorante mais a oeste da Província. Tal correlação cria, ainda, novas possibilidades prospectivas, dado que as anomalias de U investigadas poderiam ocorrer também na unidade basal do Grupo Serra da Mesa e no seu embasamento.

A Nuclebrás, no âmbito dos projetos empreendidos em Goiás, identificou algumas anomalias em região próxima ao município de Arraias, hoje localizado no sudeste

do Estado de Tocantins. Essa região anômala, denominada Alecrim, está associada a mineralizações que compõem uma pequena ocorrência de U na região.

### *Objetivo*

Este trabalho visa prospectar a extensão para o Estado de Tocantins das litologias comprovadamente anômalas em urânio mapeadas para o Estado de Goiás, por meio da aplicação da técnica de regressão múltipla, de forma semelhante à utilizada por Pires *et al.* (2010). Na região sudeste de Tocantins aflora a continuidade dessas unidades reconhecidamente anômalas, Formação Ticunzal e Suíte Aurumina, além daquelas unidades que podem ser correlacionáveis a estas: unidade basal do Grupo Serra da Mesa e seu embasamento, o Complexo Almas-Cavalcante (Paixão & Oliveira, 2007).

### *Localização*

A região estudada no presente trabalho localiza-se no extremo sudeste do Estado de Tocantins, na área que abrange os municípios de Arraias, Dianópolis, Palmeirópolis e São Valério da Natividade, cujas principais vias de acesso são, a partir de Brasília-DF, a rodovia GO-118 e, a partir de Goiânia-GO, a rodovia BR-153 (Fig. 1).

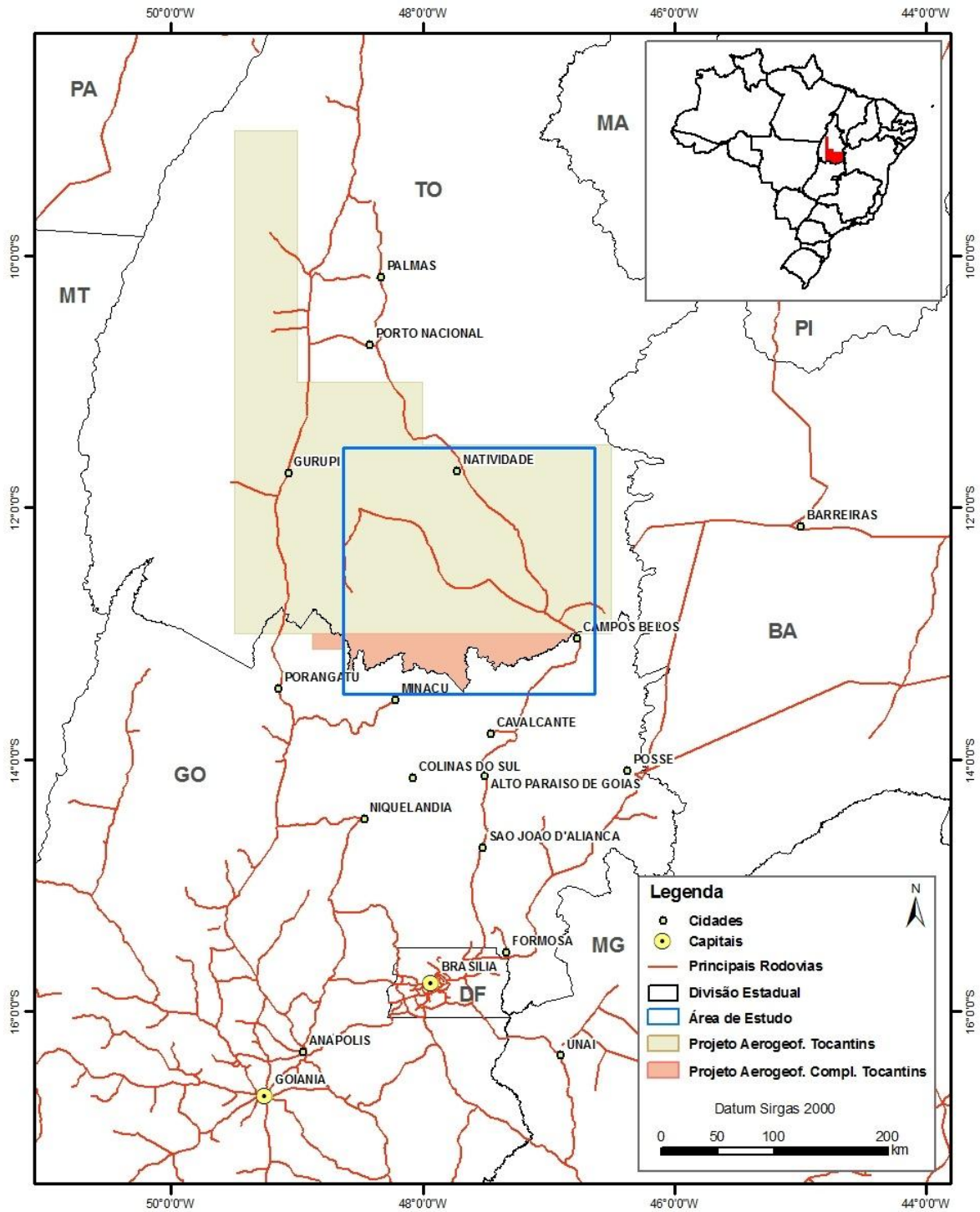


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo e dos levantamentos aerogeofísicos utilizados.



### *Contexto Geológico*

Segundo Schobbenhaus *et al.* (2004), a geologia da região prospectada é dominada pela mesma litologia granito-gnáissica aflorante em Goiás, que no mapeamento disponível para a região de estudo no Estado de Tocantins apresenta a denominação de Complexo Almas-Cavalcante (AC). Esses autores diferenciam o AC em duas unidades: a Granito-Gnáissica (ACGG) e a Gnáissico-Migmatítica (ACGM). Este complexo foi diferenciado, para a região de Cavalcante-GO, em três unidades: Formação Ticunzal (Marini *et al.*, 1978), Suíte Aurumina (Botelho *et al.*, 1999) e Província Estanífera de Goiás (Botelho, 1992), sendo as duas primeiras hospedeiras de mineralizações uraníferas.

Marini *et al.* (1978) propôs correlação entre as Coberturas Metassedimentares (CM) paleoproterozóicas que se sobrepõem a este complexo na região leste do antigo Estado de Goiás, atual região sudeste de Tocantins. Estas coberturas correspondem aos Grupos Araí, Natividade e Serra da Mesa, sendo que o trabalho de mapeamento empreendido pelo IG/UnB em 2007, na região de Jaú do Tocantins, levantou a possibilidade de correlação da unidade xistosa basal do Grupo Serra da Mesa com a principal unidade anômala investigada neste estudo, a Formação Ticunzal.

No mapa geológico simplificado (Fig. 2) foram também incluídas como litotipo das CM as rochas metavulcanossedimentares do Grupo Riachão do Ouro e os metassedimentos do Grupo Paranoá. Além do Complexo Almas-Cavalcante e das Coberturas Metassedimentares, também afloram na região de estudo os sedimentos do Grupo Bambuí, a leste, os Ortognaisses do Oeste de Goiás, a oeste, o maciço da Alcalina do Peixe (AP) no extremo sudoeste. Nesta região também aflora uma parte do granito Serra Dourada, único granito representante dos Granitos Estaníferos de Goiás (GEG) na região de estudo, e algumas intrusões que afloram no quadrante noroeste, de composição ácida a ultrabásica, que foram agrupadas na classe Plutônicas Indiferenciadas (PI).

Destarte, em função do pouco conhecimento geológico dessa região até o momento, optou-se por prospectar toda a região de afloramento do AC que é recoberta por dados aerogeofísicos recentes.



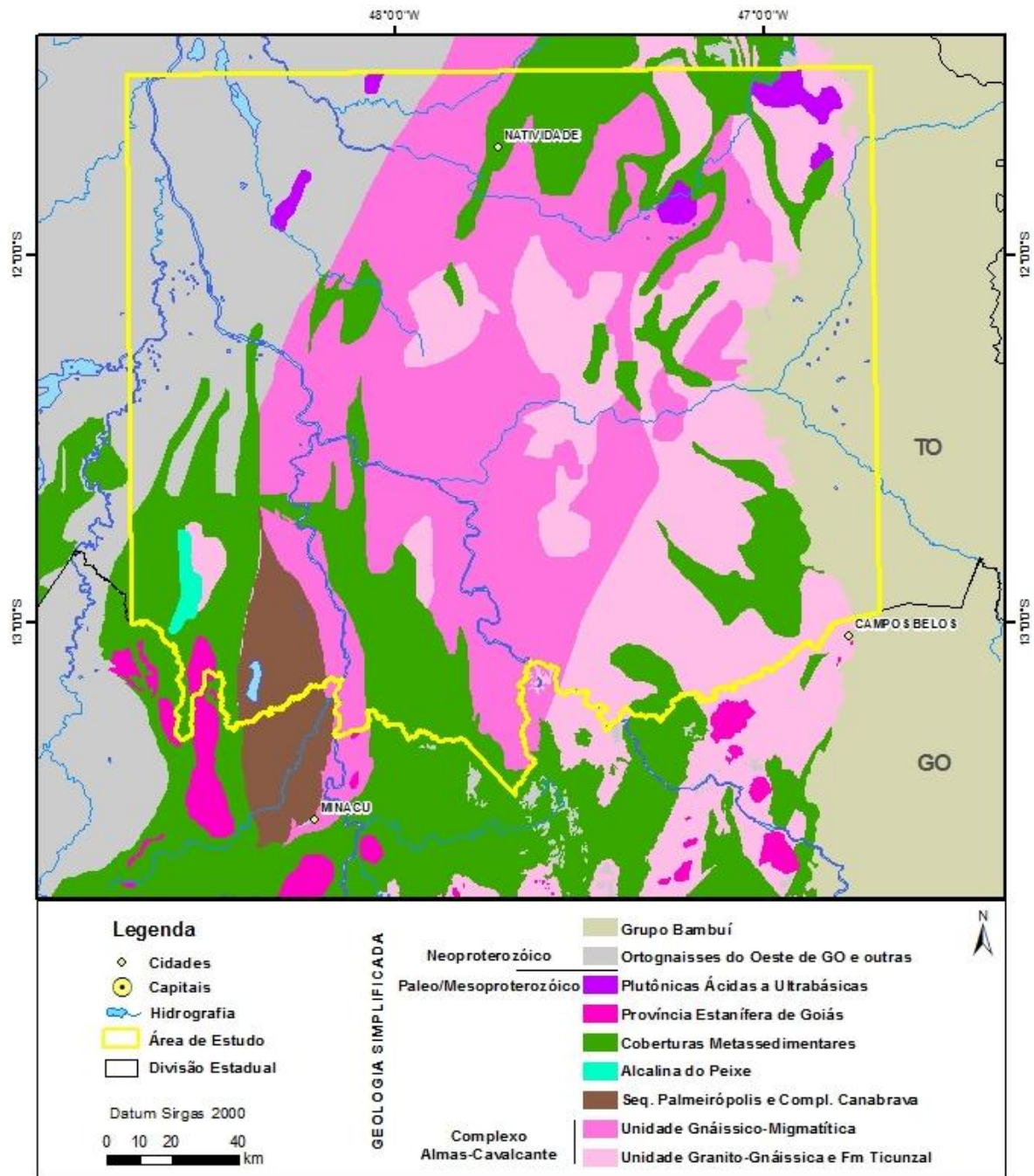


Figura 2: Contexto geológico simplificado da área de estudo, localizada no sudeste do estado de Tocantins, borda leste da FDB Setentrional. Adaptado de Schobbenhaus *et al.* (2004).

## Material e Métodos

Foram utilizados os dados de gamaespectrometria e magnetometria obtidos pelo Projeto Aerogeofísico Tocantins e por seu levantamento suplementar, o Projeto Aerogeofísico Complemento Tocantins, concebidos dentro do Programa Geologia do Brasil da CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Os dados geológicos utilizados neste estudo foram obtidos da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, publicada pela CPRM (Schobbenhaus *et al.*, 2004). As principais características desses levantamentos são apresentadas na Tab. 1.

**Tabela 1: Principais características dos levantamentos aerogeofísicos utilizados.**

<b>PROJETO</b>	<b>TOCANTINS</b>	<b>COMPLEMENTO TOCANTINS</b>
<b>Código CPRM</b>	1073	1071
<b>Intervalo de Amostragem</b>	0,1s Mag. e 1,0s Gama.	0,1s Mag. e 1,0s Gama.
<b>Altura de Vôo</b>	100m	100m
<b>Linhas de Vôo: Esp./Dir.</b>	0,5km/N-S	0,5km/N-S
<b>Linhas de Controle: Esp./Dir.</b>	10,0km/E-W	10,0km/E-W
<b>Velocidade Aprox. de Vôo</b>	270km/h	240km/h
<b>Aeromagnetômetro</b>	Scintrex CS-3	Scintrex CS-2
<b>Aerogamaespectrômetro</b>	PicoEnvirotec GRS410 - 512 ch	Exploranium GR 820 - 256 ch
<b>Tempo de Integração Gama</b>	1,0s	1,0s

O método proposto consiste na aplicação da técnica de regressão linear múltipla aos dados dos levantamentos apresentados na Tab. 1. Neste trabalho propõe-se realçar as concentrações anômalas de U presentes nos diversos litotipos seguindo a metodologia proposta por Pires *et al.* (2010), a qual é fundamentada na correlação entre as





concentrações ambientais dos radioelementos K, U e Th, e na variação dessas concentrações de acordo com os diferentes litotipos.

Segundo Pires (1995), o Th é considerado um bom mapeador litológico em função de sua pouca mobilidade no ambiente superficial. Já o elemento K, embora apresente maior mobilidade sob as mesmas condições, é um importante elemento maior constituinte de minerais formadores de rochas e, deste modo, indica a variação dos litotipos em superfície (IAEA, 2003). Destarte, as concentrações superficiais de Th e K podem ser utilizadas para prever a contribuição litológica do U, uma vez que este, por sua vez, possui alguma correlação com aqueles radioelementos. Adicionalmente, Pires *et al.* (2010) também utiliza como variável independente o produto magnetométrico Amplitude do Sinal Analítico (ASA) para caracterizar a distribuição superficial de litotipos, baseando-se no princípio de que em baixas e médias latitudes este produto se ajusta aos limites de unidades magnéticas, ressalvando-se que essas unidades nem sempre são aflorantes. Deste modo, o trabalho de Pires *et al.* (2010) utilizou a Eq. (1) para relacionar de maneira linear essas variáveis independentes a teores de urânio que devem refletir a flutuação intrínseca à variação litológica:

$$U_{(K, Th, ASA)} = cte + aK + bTh + cASA \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$U_{(K, Th, ASA)}$  = concentração teórica de urânio em função das concentrações de potássio, tório e da amplitude do sinal analítico;

**cte** = constante e

**a**, **b** e **c** = coeficientes de regressão linear para K, Th e ASA, respectivamente.

A partir da Eq. (1) procede-se à determinação dos coeficientes de regressão linear utilizando-se os canais dos três radioelementos e da ASA observados. Este trabalho utilizou as mesmas variáveis que o trabalho de Pires *et al.* (2010), porém sem proceder à normalização prévia destas. Foi, ainda, utilizado um algoritmo distinto para o cálculo dos coeficientes da regressão (*Solver Excel*), o que permitiu considerar nulo o valor da



constante. Em seguida, os coeficientes foram utilizados no cálculo de uma concentração teórica do elemento urânio (U teórico), de notação  $U_{(K,Th,ASA)}$  que, para este modelo, deve representar a variação da concentração de U nas diferentes rochas. Por fim, o  $U_{(K,Th,ASA)}$  é subtraído do canal do U observado, gerando uma nova concentração de urânio, teoricamente com significativa atenuação da influência litológica (U anômalo).

#### *Preparação dos Dados Gamaespectrométricos*

Os dados radiométricos possuem espaçamento aproximado de 75 metros entre cada medida ao longo das linhas de voo, que por sua vez são espaçadas entre si a cada 500 metros. Segundo Andrade *et al.* (1985), as mineralizações de urânio do Projeto Rio Preto estão distribuídas em pequenos corpos alongados segundo a foliação metamórfica, cujos veios mineralizados apresentam larguras menores que um metro, ou seja, com geometria de dimensões reduzidas. Assim, com o objetivo de preservar ao máximo a capacidade de detecção de alvos dos dados originais, tendo em vista que um ou dois pontos anômalos podem representar um corpo mineralizado, não foi realizada correção de *spikes*, correção de valores negativos ou normalização para a média crustal, tampouco foram os dados interpolados ou micronivelados nesta etapa de preparação para a regressão múltipla, que consistiu basicamente na análise dos dados em tabela e perfil.

Para efeitos comparativos, foi feita uma duplicata dos dados, à qual foram aplicadas as correções habituais citadas. Para este segundo grupo de dados foram gerados mapas dos canais eU, eTh e K utilizando o interpolador *Bi-directional line gridding - BiGrid*, desprezando-se as linhas de controle e com célula de 125 m (Figs. 4a, 4b e 5a). Todo o processamento foi realizado no programa *Geosoft Oasis Montaj 7.0.1*.

#### *Preparação dos Dados Magnetométricos*

Os dados de magnetometria possuem espaçamento aproximado de 7,5 metros, ou seja, 10 vezes menor que o espaçamento dos dados de gamaespectrometria. Para o procedimento de regressão foi feita re-amostragem para aproximadamente 75 metros, utilizando-se somente os dados coincidentes espacialmente com os dados de



gamaespectrometria. A partir do Campo Magnético Total (CMT) foi gerado o Campo Magnético Anômalo (CMA), pela subtração do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), conforme consta nos Relatórios Técnicos dos levantamentos (AGP-LA, 2006; Lasa, 2007). Em seguida foi gerada malha regular com célula de 75 metros por meio do interpolador *BiGrid*. Também foi aplicado micronivelamento, utilizando-se o filtro passa-alta Cosseno Direcional, antes de efetuar-se o cálculo da Amplitude do Sinal Analítico (ASA). Os dados de ASA (Fig. 5b) coincidentes com o espaçamento amostral dos dados gamaespectrométricos, foram exportados em formato tabular para integrar as variáveis independentes da regressão.

#### *Regressão Múltipla Linear dos Dados*

Segundo Pires *et al.* (2010) a técnica de regressão múltipla linear entre as concentrações estimadas de radioelementos pode ser usada para modelar e remover os efeitos de processos geológicos dentro de diferentes litotipos. O método é útil na remoção de mudanças sistemáticas grosseiras nessas concentrações e também pode ser utilizado para realçar valores discrepantes da distribuição média de teores dentro de uma unidade (Pires, 1995). O procedimento consiste na geração de um modelo linear de regressão com múltiplas variáveis independentes e apenas uma variável dependente. Teoricamente, o modelo gerado permite inferir a contribuição das variáveis independentes na formação ou construção da variável dependente.

O modelo de regressão múltipla utilizado neste trabalho foi obtido a partir dos dados aerogeofísicos restritos à área de ocorrência do Alecrim. Os dados de eU, eTh, K e ASA foram relacionados conforme a Eq. (1) para determinar os coeficientes lineares a, b e c, no aplicativo *Solver Microsoft Excel*.

Os coeficientes lineares obtidos para o modelo de regressão múltipla dos dados aerogeofísicos que recobrem a área do Projeto Rio Preto foram substituídos na Eq. (1), gerando a Eq. (2).

$$U_{(K, Th, ASA)} = 0,0682 eTh + 0,4403 K + 0,4996 ASA \quad (\text{Eq. 2})$$



Por meio desta equação, aplicada às variáveis independentes observadas, determinou-se os valores correspondentes ao U teórico [ $U_{(K, Th, ASA)}$ ] para toda a área de estudo. Subseqüentemente, subtraiu-se o U teórico do U observado, resultando nos valores de concentrações anômalas de urânio, U anômalo, conforme a Eq. (3):

$$U_{AN} = U_{OBS} - U_{(K, Th, ASA)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

$U_{AN}$  = Urânio Anômalo e

$U_{OBS}$  = Urânio Observado.

Os dados de U anômalo foram calculados para toda a área de trabalho e representam as concentrações anômalas de urânio atenuadas das influências litológicas.

## Resultados e Discussão

O processamento dos dados relativos à área de estudo gerou, como produtos intermediários, os mapas de concentrações dos radioelementos U, Th e K, além do mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA), sobre os quais foi sobreposta a informação geológica simplificada, para possibilitar a análise das assinaturas geofísicas dos litotipos (Figs. 3 e 4).

A Fig. 3a apresenta a distribuição espacial do elemento urânio, na qual é possível observar que o AC apresenta padrão bastante heterogêneo, com predomínio de extensa área de baixas concentrações (<1,0 ppm), entremeada com áreas isoladas de concentrações mais elevadas (>3,5 ppm). Dentre estas, destacam-se três regiões com altas concentrações de urânio: uma coincidente com a região do Alecrim, região sudeste da área de estudo, outra na porção central da área de interesse e a última no extremo noroeste da área. As Coberturas Metassedimentares (CM) apresentam padrão de baixa concentração, entretanto existe uma região de forte anomalia em sua interface com o AC, no extremo sudeste da área.



O mapa do elemento tório (Fig. 3b) apresenta distribuição espacial das concentrações bastante semelhante à do urânio, com predomínio de áreas heterogêneas. O AC apresenta, para o tório, a mesma região de alta concentração ( $>16,0$  ppm) na porção central da área de interesse mostrada para o urânio. Para as CM, também coincidem os teores anômalos de tório e urânio para a anomalia situada no extremo sudeste da área, na interface com o AC.

Para o elemento potássio (Fig.4a) observa-se a existência de regiões com concentrações superiores a 1,5 ppm, especialmente no sul e na porção central da área de interesse. Estes altos estão associados ao litotipo alvo desta pesquisa, o AC, embora também ocorram, neste litotipo, extensas áreas com concentrações medianas do elemento. A porção central da área estudada possui anomalia positiva, mais uma vez coincidente com as regiões já indicadas nos mapas anteriores. Para as CM existe predomínio de áreas heterogêneas, com concentrações médias levemente superiores às apresentadas pelo AC, mas que demonstram ampla variação.



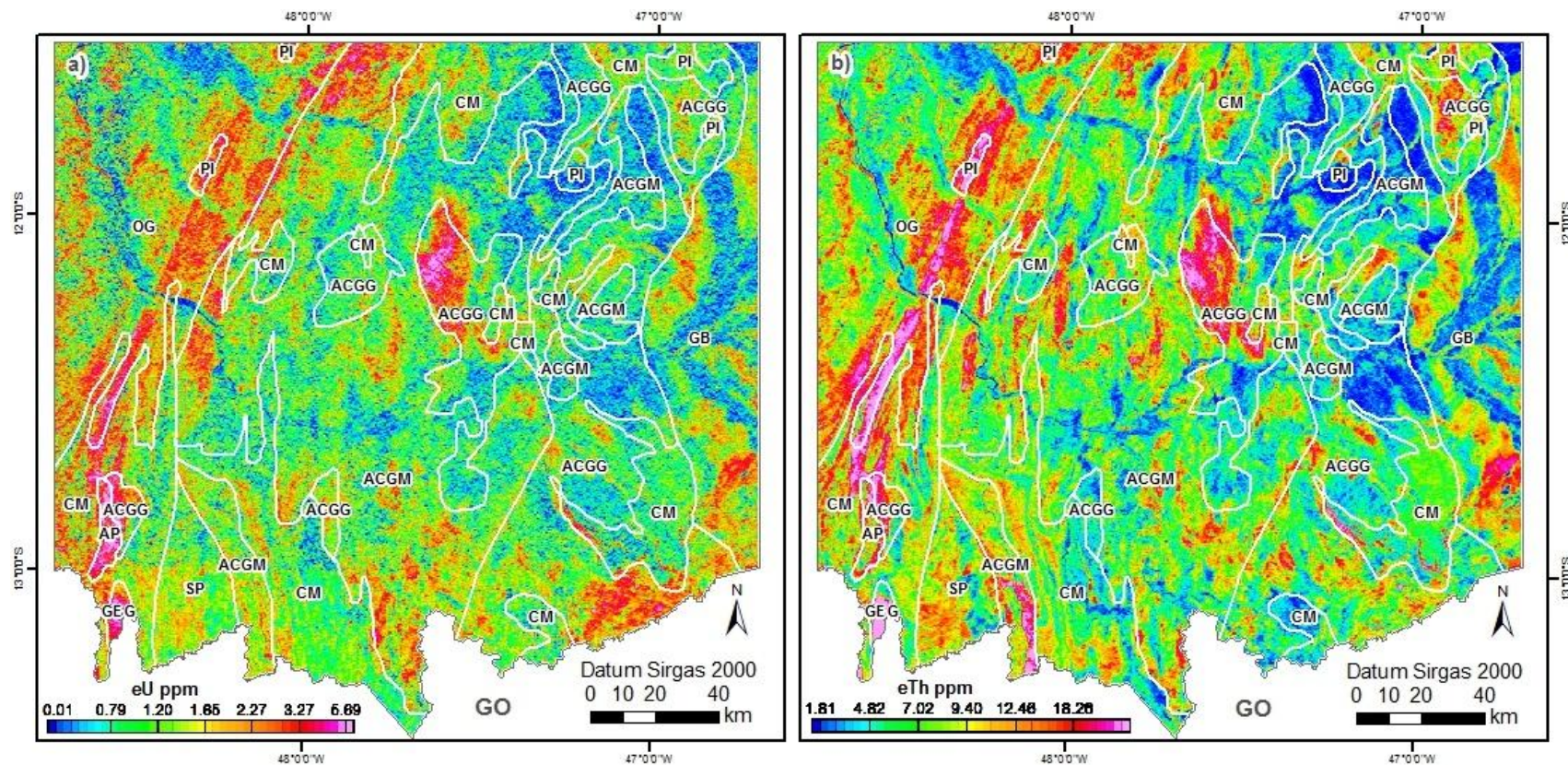


Figura 3: a) Mapa de concentração de urânio (eU) para a área de interesse, malha regular com célula de 125m. b) Mapa de concentração de tório (eTh) para a área de interesse, malha regular com célula de 125m. As linhas brancas delimitam os contatos litológicos no mapa geológico simplificado, onde: OG = Ortognaisses do Oeste de Goiás; PI = Plutônicas Indiferenciadas; CM = Coberturas Metassedimentares; AP = Alcalina do Peixe; GEG = Granitos Estaníferos de Goiás; SP = Sequencia Palmeirópolis; AC GM = Complexo Almas-Cavalcante Unidade Gnáissico-Migmatítica; AC GG = Complexo Almas-Cavalcante Unidade Granito-Gnáissica; GB = Grupo Bambuí.



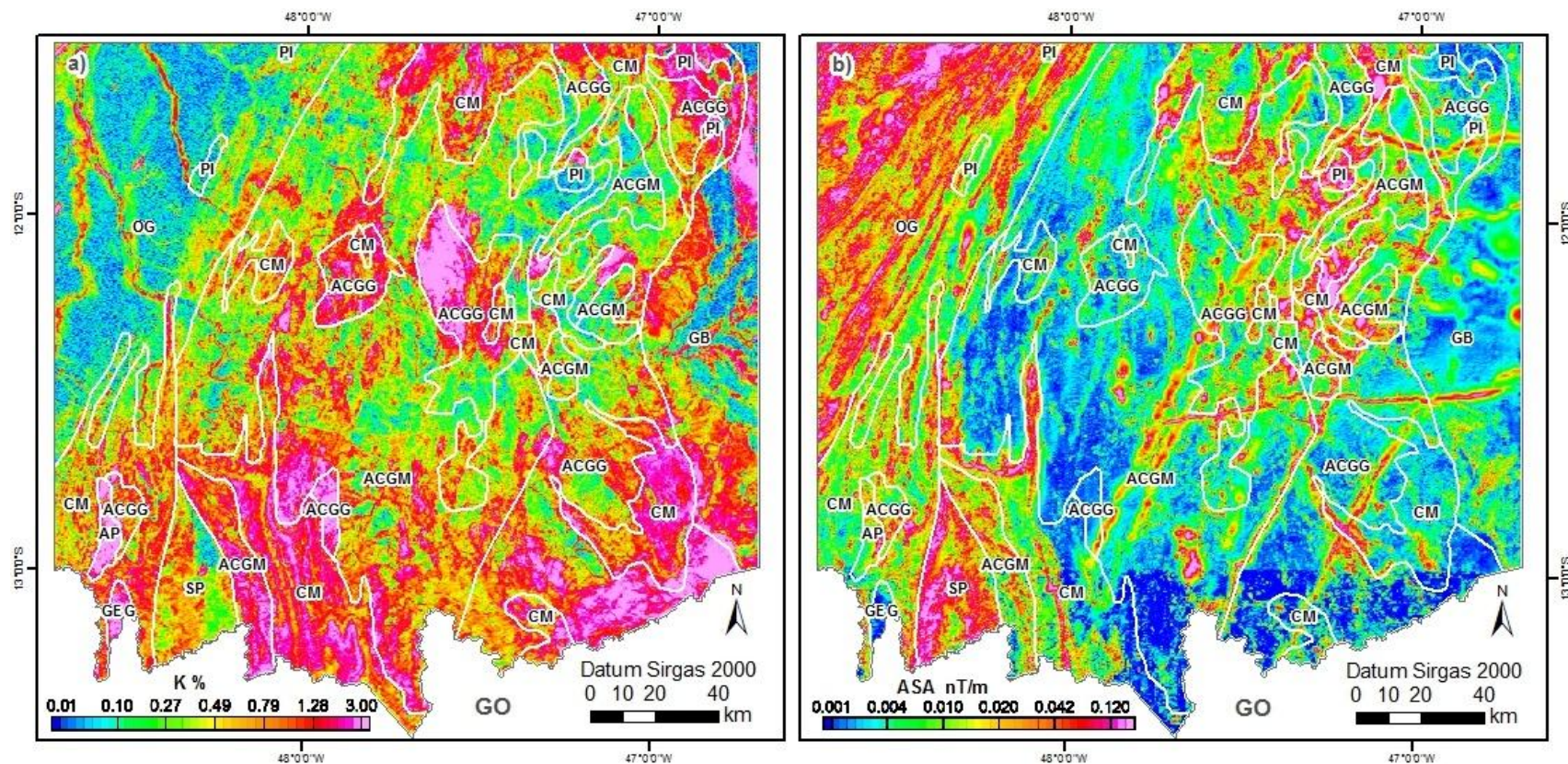


Figura 4: a) Mapa de concentração de potássio (K) para a área de interesse, malha regular com célula de 125m. b) Mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) para a área de interesse, malha regular com célula de 75m. As linhas brancas delimitam os contatos litológicos no mapa geológico simplificado, onde: OG = Ortognaisses do Oeste de Goiás; PI = Plutônicas Indiferenciadas; CM = Coberturas Metassedimentares; AP = Alcalina do Peixe; GEG = Granitos Estaníferos de Goiás; SP = Sequencia Palmeirópolis; ACGM = Complexo Almas-Cavalcante Unidade Gnáissico-Migmatítica; ACGG = Complexo Almas-Cavalcante Unidade Granito-Gnáissica; GB = Grupo Bambuí.

A Fig. 4b apresenta o mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA), que não mostra muita relação com os litotipos aflorantes na área estudada, com exceção do extremo oeste, região na qual as CM coincidem com altos magnéticos. Na porção central, dominada pelo AC, observa-se duas direções de fortes lineamentos, a primeira de direção NE-SW e a segunda de direção aproximadamente E-W. No interior do quadrante delimitado por estes lineamentos ocorrem regiões magnéticas de formas arredondadas, que coincidem com regiões de afloramento das CM.

O mapa de Urânio teórico,  $U_{(Th,K,ASA)}$ , é apresentado na Fig. 5a e representa o modelo teórico da variação espacial das concentrações de urânio decorrente dos diversos litotipos aflorantes na área de estudo. Este produto foi obtido pela aplicação da Eq. (1) aos dados aerogeofísicos eleitos como variáveis independentes para a regressão múltipla, ou seja, os canais eTh, K e ASA. Pode-se observar que a distribuição espacial das concentrações elevadas de  $U_{(Th,K,ASA)}$  coincide em grande parte com os altos valores para o mapa do tório (eTh), Fig. 3b.

Subtraindo-se as concentrações de Urânio teórico dos dados observados para o canal do urânio (eU) obteve-se o mapa de resíduos de concentrações do elemento urânio, o Urânio anômalo ( $U_{AN}$ ), que é apresentado na Fig. 5b. Este produto deve inferir as diferenças ou flutuações das concentrações de urânio já atenuadas da concentração média, ou de *background*, para o litotipo em que ocorre.

No mapa de  $U_{AN}$ , Fig. 5b, a região mapeada como Complexo Almas-Cavalcante, tanto a unidade Granito-Gnáissica (ACGG) como a Gnáissica-Migmatítica (ACGM), apresenta padrão geral de pequenos resíduos positivos a nulos, áreas em verde e amarelo no mapa, com algumas regiões isoladas discrepando desse padrão. Dentre essas últimas regiões destacam-se cinco áreas que apresentam concentrações de urânio acima do esperado para o respectivo litotipo. Estas áreas foram destacadas e enumeradas no mapa correspondente, Fig. 5b, de leste para oeste, correspondendo as quatro primeiras a anomalias dentro do litotipo-alvo, o Complexo Almas-Cavalcante (AC), e a quinta, mais a oeste, à região em que afloram a Alcalina do Peixe e a unidade Granito-Gnáissica do AC.



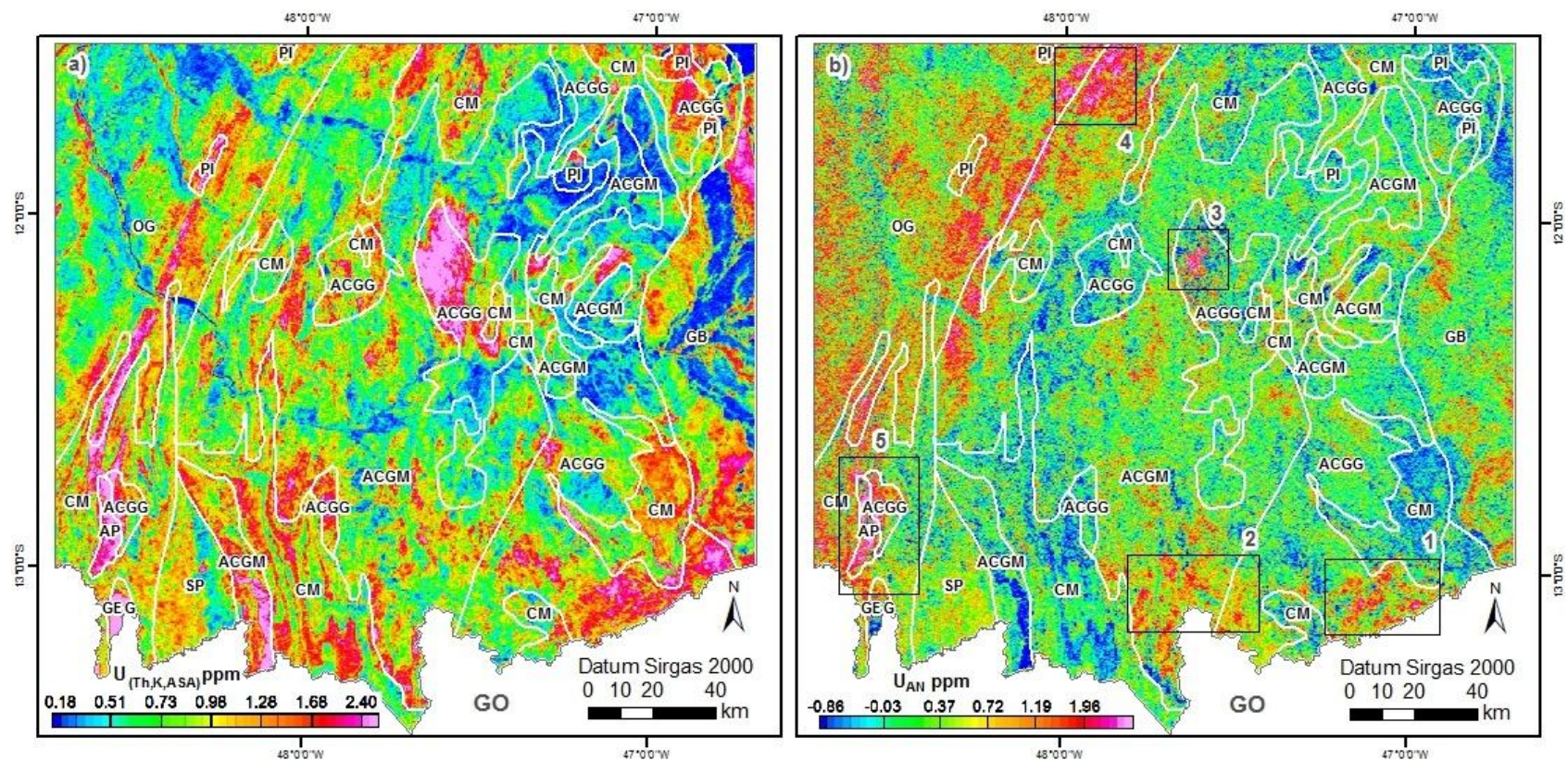
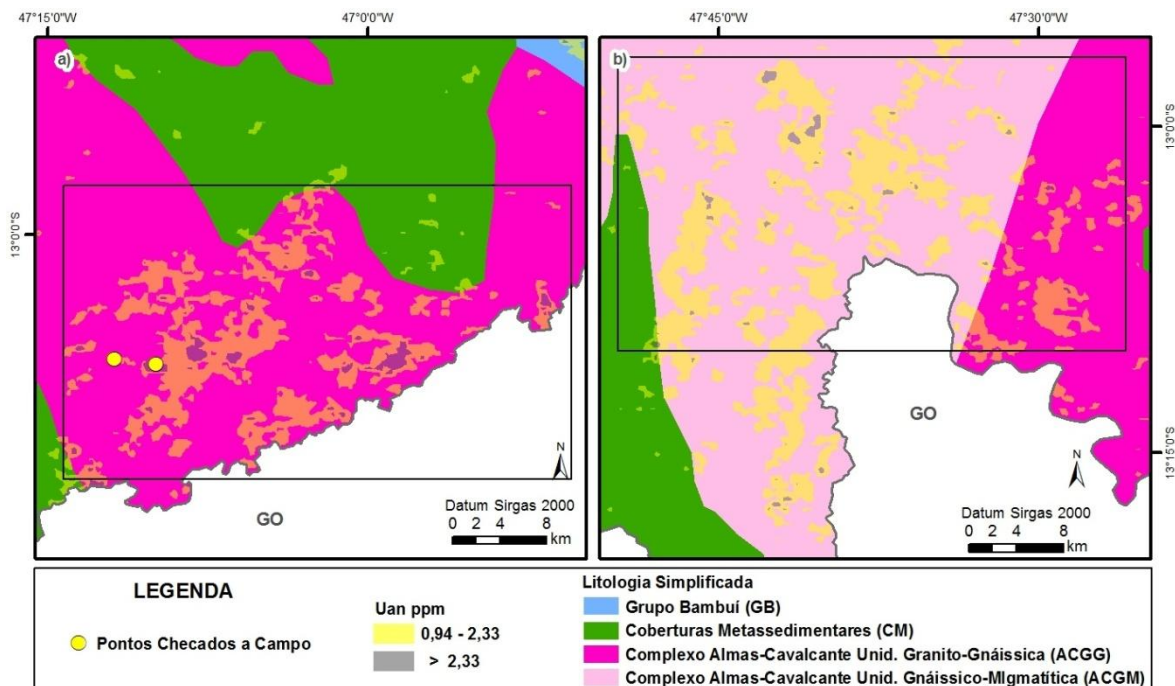


Figura 5: a) Mapa de concentração de Urânio teórico  $[U_{(K,Th,As)}]$  para a área de interesse, malha regular com célula de 75m. b) Mapa de concentração de Urânio anômalo ( $U_{AN}$ ) para a área de interesse, malha regular com célula de 75m. As linhas brancas delimitam os contatos litológicos no mapa geológico simplificado, onde: OG = Ortognaisses do Oeste de Goiás; PI = Plutônicas Indiferenciadas; CM = Coberturas Metassedimentares; AP = Alcalião do Peixe; GEG = Granitos Estaníferos de Goiás; SP = Sequencia Palmeirópolis; ACGM = Complexo Almas-Cavalcante Unidade Gnáissico-Migmatítica; ACGG = Complexo Almas-Cavalcante Unidade Granito-Gnáissica; GB = Grupo Bambuí. Foram marcadas as 5 áreas anômalas selecionadas, enumeradas na Fig 5b.

A área selecionada 1 (Fig. 6a) corresponde à região de ocorrência de mineralização de urânio do Alecrim, sendo esta a única anomalia visitada a campo no estado de Tocantins. A anomalia geofísica apresenta *trend* de direção E-W, mesma direção da foliação milonítica ao longo da qual parecem ocorrer mineralizações de U. Utilizando o gamaespectrômetro portátil RSI, modelo RS 230 BGO Super-SPEC, com tempo de integração de 120 segundos, encontraram-se concentrações máximas de eU por volta de 18 ppm. Foram localizadas também algumas trincheiras abertas por trabalhos de pesquisa anteriores, nas quais foram realizadas algumas medições, obtendo-se concentrações de eU de cerca de 12 ppm.

A área selecionada 2 (Fig. 6b) corresponde à extensão para oeste da primeira área, apresentando padrão geofísico de anomalias muito semelhante. Entretanto, o *trend* E-W é substituído por outro de direção NE-SW e as anomalias ocorrem de forma mais dispersa, além de apresentarem concentrações anômalas inferiores às da área 1.



**Figura 6:** a) Mapa de  $U_{AN}$  para a Área Seleccionada 1 sobreposto à geologia simplificada; b) Mapa de  $U_{AN}$  para a Área Seleccionada 2 sobreposto à geologia simplificada.



A área 3 (Fig. 7a), associada ao litotipo ACGG, corresponde à porção central dos mapas radiométricos que apresentou altos valores para os três canais de radioelementos. Nota-se que, apesar de uma região maior apresentar altas concentrações de urânio, tório e potássio, apenas uma pequena área foi realçada no mapa de Urânio anômalo, indicando a capacidade da técnica de regressão múltipla em discriminar concentrações anômalas mesmo no interior de litotipos de *background* elevado.

A área selecionada 4 (Fig. 7b), localizada no quadrante noroeste do mapa de  $U_{AN}$ , corresponde à área de afloramento do AC, unidade Gnáissica-Migmatítica, próxima ao contato com os Ortognaisses do Oeste de Goiás (OG). Nessa área são observadas amplas regiões anômalas que extrapolam os limites da ACGM, ocorrendo também sobre os litotipos mapeados como OG. Essas áreas anômalas ocorrem em áreas de relevo arrasado, o que levanta a possibilidade de serem associadas a coberturas lateríticas que se enriqueceram em urânio durante a evolução dos processos pedológicos.

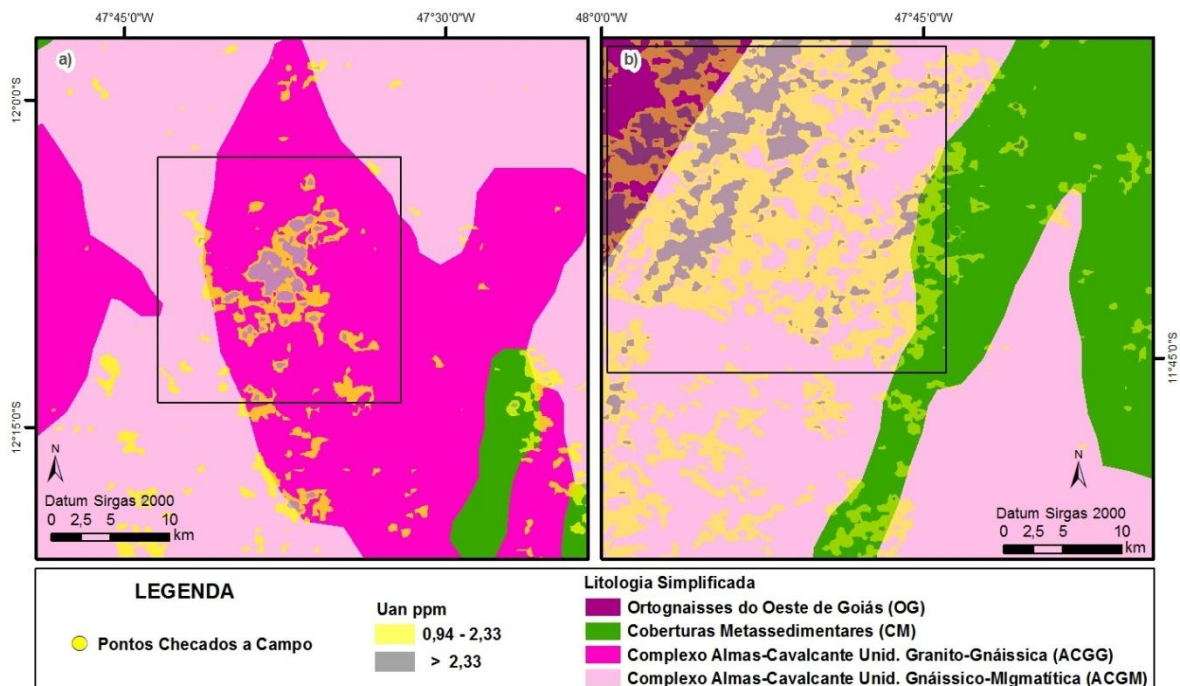


Figura 7: a) Mapa de  $U_{AN}$  para a Área Seleccionada 3 sobreposto à geologia simplificada; b) Mapa de  $U_{AN}$  para a Área Seleccionada 4 sobreposto à geologia simplificada.

A área selecionada 5 corresponde aos afloramentos da Alcalina do Peixe (AP) que apresentou alto eU, alto K e baixo eTh, além de baixa ASA, conforme pode ser

observado nas Figs. 3, 4 e 5. Deste modo, acredita-se que como o modelo gerado não contemplou rochas com essa composição no cálculo dos respectivos coeficientes, possivelmente o realce gerado não seja adequado para investigações sobre litologias de composição tão diversa e, portanto, não represente concentrações significativas do elemento urânio. Assim, não foi produzido mapa específico para essa área.

### **Conclusões**

Os resultados obtidos por meio da metodologia proposta permitiram a identificação de anomalias aerogeofísicas correspondentes às ocorrências de urânio do Alecrim, além de realçar outras cinco áreas anômalas, novos alvos prospectivos, que foram selecionadas para prospecção de maior detalhe (Fig. 5b).

As áreas 1 e 2 possuem características semelhantes e já são conhecidas ocorrências de mineralizações na área 1, o que favorece sua eleição prioritária como área a ser prospectada em maior detalhe. A área 3 demonstrou a aplicabilidade da técnica de regressão linear múltipla como atenuadora da influência litológica sobre as concentrações anômalas de urânio e representa alvo prospectivo de grande importância para a presente e futuras investigações.

As áreas 4 e 5 possuem características que põem em dúvida seu potencial em abrigar mineralizações de urânio. A área 4 corresponde à região de relevo arrasado na qual existem poucos afloramentos e predominam solos lateríticos, enriquecidos em U por processos pedológicos, que podem ser a fonte das anomalias detectadas. A área 5 corresponde à região de afloramento da Alcalina do Peixe, litologia de composição muito diversa das utilizadas para o cálculo de coeficientes da regressão e que, portanto, pode ter sido realçada sem apresentar concentrações importantes do radioelemento prospectado.

## Referências Bibliográficas

- ANDRADE, S.M.; LIBERAL, G.S. & SANTOS FILHO, J.L. 1985. Depósitos de urânio de Campos Belos e Rio Preto – Goiás. *In: C. SCHOBENHAUS FILHO (coord.) Principais Depósitos Minerais do Brasil*, Rio de Janeiro: DNPM. v.1, p.169 – 75.
- AGP-LA, 2006. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectométricos - Levantamento Aerogeofísico Tocantins. CPRM/MME/PGB. 478p.
- BOTELHO, N.F.; ALVARENGA, C.S.; MENESES, P.R. & D'EL REY L.H. 1999. Suíte Aurumina: Uma Suíte de Granitos Paleoproterozóicos, Peraluminosos e Sin-tectônicos na Faixa Brasília, VII Simpósio de Geologia do Centro-Oeste e X Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Anais, p. 17.
- DAHLKAMP, F.J. 1993. *Uranium ore deposits*. Springer, Berlin, 460 p.
- DARDENNE, M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. *In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds). Tectonic Evolution of South America*. 31<sup>st</sup> Int. Geol. Congr., Rio de Janeiro, p. 231-263.
- DICKSON, B. L. & SCOTT, K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma ray surveys - adding the geochemical factors; *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 187-200.
- FUCK, R.A. 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. *In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 4, Brasília, 1994. Atas...*, Brasília, p. 184-187.
- GOMES, A.J.P.; CRUZ, P.R. & BORGES, L.P. 2003. Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio. *In: L. A. BIZZI, C. SCHOBENHAUS, R. M. VIDOTTI & J. H. GONÇALVES (eds.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, Brasília: CPRM, Brasília, p.: 577-628.

- GRASTY, R.L., 1979. *Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration – theory and operational procedures*. In: Geophysics and Geochemistry in the search for metallic ores. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, Paper 10B.
- IAEA, 2003. *Guidelines for Radioelement Mapping using Gamma Ray Spectrometry Data*.
- LASA 2007. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos - Levantamento Aerogeofísico Complemento do Tocantins. CPRM/MME/PGB. 124p.
- MARINI, O.J.; LIBERAL, G.S.; REIS, L.T.; TRINDADE, C.A.H. & SOUZA, S.L. 1978. Nova unidade litoestratigráfica do Pré-cambriano do Estado de Goiás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife. Anais, Recife, p. 126.
- MARINI, O.J.; FUCK, R.A.; DANNI, J.C.M.; DARDENNE, M.A.; LOGUEIRO, S.O.C. & RAMALHO, R. 1984. As faixas de dobramentos Brasília, Uruaçu e Paraguai-Araguaia e o Maciço Mediano de Goiás. In: Schobbenhaus C., Campos D.A., Derze G.R., Asmus H.E. (coords.). *Geologia do Brasil*. DNPM. Brasília. p. 251-303.
- MINTY, B.R.S. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 39-50.
- PAIXÃO, M. M. & OLIVEIRA, R.C. 2007. Projeto Jaú do Tocantins – TO, Subárea XIV. *Trabalho Final de Graduação – 2007*. IG-UnB. 225 p.
- PAIXÃO, M. M., VIDOTTI R.M., PIRES A.C.B. 2011. Regressão múltipla aplicada a dados aerogeofísicos na prospecção de Urânio no sudeste de Tocantins . In: SBG, XII Simpósio de Geologia da Amazônia, Boa Vista. Anais. CD-ROM.
- PIMENTEL, M.M.; FUCK, R.A. & BOTELHO, N.F. 1999. Granites and the geodynamic history of the neoproterozoic Brasília belt, Central Brazil: a review. *Lithos*, 46: 463-483
- PIMENTEL, M.M.; JOST, H. & FUCK, R.A. 2004. O embasamento da Faixa Brasília e o Arco Magmático de Goiás. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.E., Brito-Neves B.B. (eds) 2004. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Marques de Almeida*, p 355-369.

- PIRES, A.C.B. 1995. Identificação Geofísica de Áreas de Alteração Hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, S. Paulo, 25 (1): 61-68.
- PIRES, A.C.B.; VIDOTTI, R.M., & CARMELO, A.C. 2010. Realce de anomalias de urânio por regressão múltipla em levantamento aerogeofísico no sudeste de Goiás. *In*: SBGF, IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. Anais. DVD.
- SCHOBENHAUS, C.; GOLÇALVES, J.H.; SANTOS, J.O.S.; ABRAM, M.B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G.M.M.; VIDOTTI, R.M.; RAMOS, M.A.B. & JESUS, J.D.A. (Eds.). 2004. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo*, Sistema de Informações Geográficas – SIG, Programa de Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM.
- WILFORD, J. & MINTY, B. 2007. The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes. *In*: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), *Digital Soil Mapping an Introductory Perspective*. Developments in Soil Science, 31. Elsevier.

## Capítulo VI

### CONCLUSÕES

---

Os resultados para os Estados de Goiás e Tocantins apresentados nos Capítulos IV e V, respectivamente, permitem concluir que a aplicação da técnica de regressão múltipla é eficaz na modelagem das influências litológicas sobre as concentrações de urânio obtidas por levantamentos aéreos. Tal modelagem permitiu a atenuação observada nos teores de U dos Granitos Estaníferos de Goiás na comparação feita entre o mapa de eU ( Cap. IV Fig. 4a) e o mapa do Urânio anômalo (Cap IV Fig. 5a). Efeito semelhante pôde ser observado para Tocantins na Área Seleccionada 3, quanto aos produtos correspondentes ao eU e U anômalo (Cap. V Figs. 3a e 5b), que evidencia a remoção do *background* elevado em urânio dessas litologias.

A prospecção de Urânio pretendida, objetivo central desta dissertação, obteve êxito, pois além de terem sido realçadas ocorrências uraníferas conhecidas em Goiás e Tocantins, foram também identificadas significativas anomalias em regiões inseridas nas áreas prospectadas pelos projetos Rio Preto e Campos Belos e diversas outras situadas fora dessas áreas, sendo ambas favoráveis à execução de pesquisas exploratórias de maior detalhe. Estes novos alvos prospectivos são explicitados no Capítulo IV Figs. 5b e 5c e no Capítulo V Figs. 6 e 7. A continuação deste trabalho deverá efetuar a verificação desses alvos a campo.

A análise comparativa dos coeficientes de regressão múltipla padronizados que foram calculados para a área do Projeto Rio Preto permite concluir que a variável independente ASA é insignificante para a previsão do U no modelo de regressão múltipla obtido.

Para futuros trabalhos sugere-se a busca de novas variáveis independentes que possam somar-se às variáveis aqui utilizadas, como forma de refinamento do modelo estatístico, como por exemplo razões entre os canais radiométricos, dados geoquímicos e produtos derivados da magnetometria. Adicionalmente, para a região de estudo, a substituição



da variável ASA torna-se necessária, pois esta agrega uma contribuição mínima na previsão da variável dependente, podendo, eventualmente, ser substituída por outros produtos magnéticos, como derivadas de primeira e segunda ordens do campo magnético anômalo.

Recomenda-se, ainda, a integração dos resultados aqui apresentados com dados de natureza diversa, como produtos de sensoriamento remoto, dados de geologia estrutural, dados geoquímicos, mapas pedológicos e dados topográficos, como forma de agregar informações que auxiliem no processo de investigação e avaliação das anomalias detectadas.



## Capítulo VII

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALMEIDA, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4): 349-364.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. & FUCK, R.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras *In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8, Campina Grande, *Anais*, 363-391.
- ANDRADE, S.M.; LIBERAL, G.S. & SANTOS FILHO, J.L. 1985. Depósitos de urânio de Campos Belos e Rio Preto – Goiás. *In: C. SCHOBENHAUS FILHO (coord.) Principais Depósitos Minerais do Brasil*, Rio de Janeiro: DNPM. v.1, p.169 – 75.
- AGP-LA, 2006. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectométricos - Levantamento Aerogeofísico Tocantins. CPRM/MME/PGB. 478p.
- BLUM, M.L.B. 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 229p.
- BOTELHO, N.F. 1992. Les ensembles granitiques subalcalins a peralumineux mineralisés en Sn et In de la Sous-Province Parana, État de Goiás, Brésil. Tese de doutorado. Université Pierre et Marie Curie, LISE / CNRS, França.
- BOTELHO, N.F.; ALVARENGA, C.S.; MENESES, P.R. & D'EL REY L.H. 1999. Suíte Aurumina: Uma Suíte de Granitos Paleoproterozóicos, Peraluminosos e Sin-tectônicos na Faixa Brasília, VII Simpósio de Geologia do Centro-Oeste e X Simpósio de Geologia de Minas Gerais, *Anais*, p. 17.
- CUNEY, M. 2009. The extreme diversity of uranium deposits. *In: Miner Deposita*. 44:3-9. Springer-Verlag.



- DAHLKAMP, F.J. 1993. *Uranium ore deposits*. Springer, Berlin, 460 p.
- DARDENNE, M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. *In*: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds). *Tectonic Evolution of South America*. 31<sup>st</sup> Int. Geol. Congr., Rio de Janeiro, p. 231-263.
- DICKSON, B. L. & SCOTT, K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma ray surveys - adding the geochemical factors; *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 187-200.
- DUARTE, C.R. & BONOTTO, D.M., 2006. Gamaespectrometria Aplicada ao Projeto Rio Preto (GO). *Geochimica Brasiliensis*, v. 20, n.3, p. 278-294.
- ELETRONUCLEAR, 2011. Panorama da Energia Nuclear, Novembro de 2011. GLP.G, Gerência de Planejamento Estratégico. Em <http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=GxTb5TAen5E%3D&tabid=297>, acessado em 22 de junho de 2012.
- FIGUEIREDO FILHO, P. M. *et ali*. 1982. Projeto Rio Preto – Relatório Final. Nuclebrás/SUPPM/EGOLPM (Relatório interno).
- FUCK, R.A.; MARINI, O.J.; DARDENNE, M.A. & FIGUEIREDO, A.N. 1988. Coberturas metassedimentares do Proterozoico Médio, os grupos Araí e Paranoá na região de Niquelândia – Colinas, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 18:54-62.
- FUCK, R.A. 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. *In*: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 4, Brasília, 1994. Atas..., Brasília, p. 184-187.
- GOMES, A.J.P.; CRUZ, P.R. & BORGES, L.P. 2003. Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio. *In*: L. A. BIZZI, C. SCHOBENHAUS, R. M. VIDOTTI & J. H. GONÇALVES (eds.) *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, Brasília: CPRM, Brasília, p.: 577-628.



- GRASTY, R.L., 1979. *Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration – theory and operational procedures*. In: Geophysics and Geochemistry in the search for metallic ores. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, Paper 10B.
- IAEA, 2003. *Guidelines for Radioelement Mapping using Gamma Ray Spectrometry Data*. IAEA TECDOC Series No. 1363, International Atomic Energy Agency, Vienna. 173 p.
- IAEA, 2009. *World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) with Uranium Deposit Classification*. IAEA TECDOC Series No. 1629, International Atomic Energy Agency, Vienna. 117 p.
- LANDIM, P.M.B. *Análise estatística de dados geológicos multivariados*. Lab. Geomática, DGA – IGCE-Unesp/Rio Claro, Texto Didático 3, 128 pp. 2000. Disponível em <http://www.rc.enesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso em: 10 de setembro de 2011.
- LANGMUIR, D. 1978. Uranium solution–mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochim Cosmochim Acta* 42:547–569.
- LASA 2006. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos - Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás - 3ª Etapa. CONVÊNIO SGM / /MME / CPRM - SIC / SGM / FUNMINERAL. 138p.
- LASA 2007. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos - Levantamento Aerogeofísico Complemento do Tocantins. CPRM/MME/PGB. 124p.
- MACLEOD, I.N., JONES, K. & DAI, T.F. 1993. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic data at low magnetic latitudes. *Exploration Geophysics*, 24, p. 679-688.
- MARINI, O.J.; LIBERAL, G.S.; REIS, L.T.; TRINDADE, C.A.H. & SOUZA, S.L. 1978. Nova unidade litoestratigráfica do Pré-cambriano do Estado de Goiás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife. Anais, Recife, p. 126.
- MARINI, O.J.; FUCK, R.A.; DANNI, J.C.M.; DARDENNE, M.A.; LOGUEIRO, S.O.C. & RAMALHO, R. 1984. As faixas de dobramentos Brasília, Uruaçu e Paraguai-



- Araguaia e o Maciço Mediano de Goiás. In: Schobbenhaus C., Campos D.A., Derze G.R., Asmus H.E. (coords.). *Geologia do Brasil*. DNPM. Brasília. p. 251-303.
- MILLIGAN, P.R. & GUNN, P.J. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 63-75.
- MINTY, B.R.S. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 39-50.
- MOREIRA, M.L.O., MORETON, L.C., ARAÚJO, V.A., LACERDA FILHO, J.V., COSTA, H.F. 2008. Geologia do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC – FUNMINERAL.
- MOURA, L.H.A. & SILVA, N.G.C. 2005. Projeto Nova Roma – Porto Real, Subárea IX. *Trabalho Final de Graduação – 2005*. IG-UnB. p.147.
- PAIXÃO, M. M. & OLIVEIRA, R.C. 2007. Projeto Jaú do Tocantins – TO, Subárea XIV. *Trabalho Final de Graduação – 2007*. IG-UnB. 225 p.
- PAIXÃO, M. M., VIDOTTI R.M., PIRES A.C.B. 2011. Regressão múltipla aplicada a dados aerogeofísicos na prospecção de Urânio no sudeste de Tocantins . In: SBG, XII Simpósio de Geologia da Amazônia, Boa Vista. Anais. CD-ROM.
- PIMENTEL, M.M., FUCK, R.A. & BOTELHO, N.F. 1999. Granites and the geodynamic history of the neoproterozoic Brasília belt, Central Brazil: a review. *Lithos*, 46: 463-483.
- PIMENTEL, M.M.; JOST, H. & FUCK, R.A. 2004. O embasamento da Faixa Brasília e o Arco Magmático de Goiás. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.E., Brito-Neves B.B. (eds) 2004. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Marques de Almeida*, p 355-369.
- PIRES, A.C.B. 1995. Identificação Geofísica de Áreas de Alteração Hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, S. Paulo, 25 (1): 61-68.
- PIRES, A.C.B.; VIDOTTI, R.M., & CARMELO, A.C. 2010. Realce de anomalias de urânio por regressão múltipla em levantamento aerogeofísico no sudeste de Goiás. In: SBGF, IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. Anais. 1 DVD.



- ROEST, W.R., VERHOEF, V., & PILKINGTON, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 35, p. 293-302.
- SCHOBENHAUS, C.; GOLÇALVES, J.H.; SANTOS, J.O.S.; ABRAM, M.B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G.M.M.; VIDOTTI, R.M.; RAMOS, M.A.B. & JESUS, J.D.A. (Eds.). 2004. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo*, Sistema de Informações Geográficas – SIG, Programa de Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM.
- SPARRENBERGER, I. & TASSINARI, C.C.G. 1998. Idade da mineralização estanífera da Subprovincia do Paranã (GO) através de datações U-Pb em cassiterita. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, Anais, Resumos, 143.*
- TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R. & TAIOLI, F. (Orgs.). 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos. 568 p.
- Ux Consulting Company. at: [http://www.uxc.com/review/uxc\\_PriceChart.aspx?chart=spot-u3o8-2yr](http://www.uxc.com/review/uxc_PriceChart.aspx?chart=spot-u3o8-2yr), acesso em 26 de junho de 2012.
- WILFORD, J. 2011. A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. *Geoderma* (2011), doi:10.1016/j.geoderma.2010.12.022.
- WILFORD J.R.; BIERWIRTH P.N. & CRAIG M.A. 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *In: Airborne Magnetic and Radiometric Surveys, AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17:201-216.
- WILFORD, J. & MINTY, B. 2007. The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes. *In: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), Digital Soil Mapping an Introductory Perspective. Developments in Soil Science, 31. Elsevier.*