

MARIA DAS GRAÇAS ALVES COSTA

**GAMASPECTROMETRIA E MAGNETOMETRIA EM MAPEAMENTO DE
SOLOS NO DOMÍNIO DE ROCHAS PELÍTICAS DO GRUPO BAMBUÍ, MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C837g
2013
Costa, Maria das Graças Alves, 1979-
Gamaespectrometria e magnetometria em
mapeamento de solos no domínio de rochas pelíticas do
Grupo Bambuí, MG / Maria das Graças Alves Costa. - Viçosa,
MG, 2013.
ix, 72 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador : João Carlos Ker.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 60-65.

1. Mapeamento do solo - Minas Gerais.
2. Radioisótopos. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em
Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

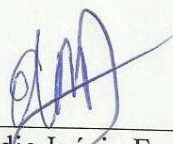
CDD 22. ed. 631.498151

MARIA DAS GRAÇAS ALVES COSTA

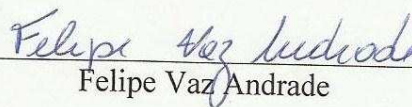
**GAMASPECTROMETRIA E MAGNETOMETRIA EM MAPEAMENTO DE
SOLOS NO DOMÍNIO DE ROCHAS PELÍTICAS DO GRUPO BAMBUÍ, MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

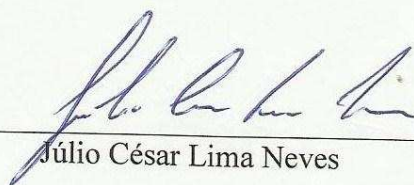
APROVADA: 31 de julho de 2013.



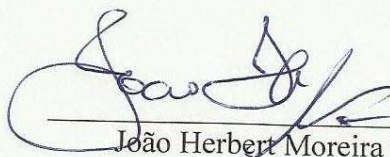
Elpídio Inácio Fernandes Filho
(Coorientador)



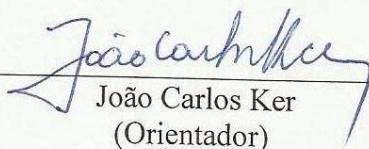
Felipe Vaz Andrade



Júlio César Lima Neves



João Herbert Moreira Viana



João Carlos Ker
(Orientador)

À minha mãe, meu exemplo de vida e amor.

Com amor dedico.

“As correntes do rio profundo foram mais generosas que o meu remar contra elas. Não cheguei aonde planejava ir. Cheguei, sem querer, aonde meu coração queria chegar, sem que eu o soubesse”. Rubens Alves

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade da vida.

À minha mãe pelo amor incondicional e constante incentivo.

À minha tia Ercília (in memoriam) pelo carinho e incentivo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realização do curso.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

A Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, pelo fornecimento dos dados para a realização desse trabalho.

Ao Professor João Carlos Ker por ser um exemplo de dedicação ao magistério, pela oportunidade e amizade.

Ao Professor Elpídio pelo incentivo, ensinamentos e amizade.

Ao Professor Maurício Paula Ferreira Fontes pelos ensinamentos e atenção.

Aos professores Felipe Vaz, Carlos Ernesto, Júlio Neves e ao pesquisador João Herbert pelas valiosas sugestões a este trabalho.

Aos amigos Daniel e Ecila para contribuição durante o desenvolvimento desse trabalho.

A secretária Lú pela inestimável amizade.

Ao Chico e a Rita, pela amizade e convivência.

Aos laboratoristas do DPS pela amizade e auxílio constantes.

Aos professores do DPS pelos ensinamentos de inestimável valor.

Aos amigos do DPS, que por serem inúmeros não os citarei, mas levarei sempre comigo as lembranças da convivência amistosa durante a preparação para provas, trabalhos, viagens de campo e diversão.

Aos amigos de Sabará pelo incentivo e amizade.

Aos colegas de trabalho do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sudeste de Minas Gerais – Campus São João Del Rei pelo incentivo e apoio.

Aos que não cito aqui, mas, que de alguma forma contribuíram para o meu trabalho e aprendizado.

BIOGRAFIA

MARIA DAS GRAÇAS ALVES COSTA, filha de Hélio Martins da Costa e Elza Alves Martins da Costa, nasceu em Sabará, Minas Gerais, em 16 de dezembro de 1979.

Graduou-se em Geografia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) em 2007, momento em que ingressou no curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas da UFV, obtendo o título de Master Scientiae em julho de 2009. No mesmo ano e, no ingressou no curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas da UFV.

Em julho de 2012, ingressou na carreira de magistério através de concurso público no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Sudeste de Minas Gerais – Campus São João Del Rei.

ÍNDICE

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5. CONCLUSÕES	59
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÊNDICE	66

RESUMO

COSTA, Maria das Graças Alves, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2013. **Gamaespectrometria e magnetometria em mapeamento de solos no domínio de rochas pelíticas do Grupo Bambuí, MG.** Orientador: João Carlos Ker. Coorientadores: Elpídio Inácio Fernandes Filho e Maurício Paulo F. Fontes.

Os estudos sobre a distribuição espacial de solos no Estado de Minas Gerais avançam pouco e os mapas de solos disponibilizados, ou em elaboração, são geralmente generalizados. É recorrente a busca por novas ferramentas que possam auxiliar o mapeamento de solos, buscando a modelagem da distribuição das classes de solos na paisagem, a partir do estabelecimento de padrões, bem como dados que colaborem para a predição sobre suas propriedades. O presente trabalho consistiu no levantamento, processamento e interpretação dos dados de gamaespectrometria e magnetometria no domínio de rochas pelíticas do Grupo Bambuí no município de Curvelo em Minas Gerais. Foram utilizados dados digitais obtidos de aerolevantamento gamaespectrométrico e magnetométrico com o objetivo de caracterizar a distribuição espacial das concentrações de radionuclídeos (K, eU e eTh) e da susceptibilidade magnética, cobrindo a área central de Minas Gerais. Esses dados foram processados e analisados juntamente com imagens Rapideye, mapa geológico, mapa de solos, modelo digital de elevação e mapa de declividade, com o propósito de analisá-los para avaliar a eficiência dos dados gamaespectrométricos e magnetométricos na distinção de classes de solos da região. Para tal, realizou-se a interpretação das imagens individuais dos canais de K, U (eU) e Th (eTh), buscando critérios para a delimitação das unidades de mapeamento a partir desses elementos. Os teores de K, eU e eTh obtidos por gamaespectrometria foram correlacionados com atributos físicos e químicos dos solos. A análise e interpretação dos dados a partir da elaboração dos mapas de contorno de K, eU e eTh possibilitaram o entendimento sobre o comportamento e a mobilidade desses radionuclídeos nos diversos compartimentos ambientais da área de estudo. O elemento K mostrou-se adequado para a distinção de Cambissolos e Latossolos. A distribuição espacial dos elementos eU e eTh a partir de uma análise qualitativa mostrou ser adequada para a predição da textura dos solos, pois ambos foram adequados na delimitação das unidades de mapeamento constituídas por solos mais argilosos. Além disso, identificou-se uma correlação estatisticamente significativa entre eU e eTh com teor de argila, tanto no horizonte A ($r^2 = 0,58$ e $r^2 = 0,51$) e horizonte B ($r^2 = 0,56$ e $r^2 = 0,64$, $p < 0,05$). Permitindo constatar que os teores de eU e eTh são adequados para a

predição da textura dos solos, corroborando a análise qualitativa. A distribuição dos elementos eU e eTh permitiu concluir que estes elementos não são litogênicos, uma vez que eles ocorrem em concentrações muito baixas nos Cambissolos. Os dados magnetométricos foram adequados para definir as áreas com certa magnetização no Grupo Bambuí, provavelmente relacionada à detecção de extenso alinhamento magnético que vêm sendo interpretado como diques de diabásio datados do período Cretáceo.

ABSTRACT

COSTA, Maria das Graças Alves, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2013. **Gammasspectrometry and magnetometry: soil mapping in the field of pelitic rocks Bambuí Group, MG** Adviser: João Carlos Ker. Co-advisers: Elpídio Inácio Fernandes Filho and Maurício Paulo F. Fontes.

Studies on the spatial distribution of soils in the State of Minas Gerais little advance and soil maps available, or in development, are usually generalized. It is often the search for new tools that can assist the mapping of soils, seeking modeling the class distribution of soils in the landscape, from the establishment of standards, as well as data which collaborate to predict about their properties. The present work consisted in the collection, processing and interpretation of magnetometry and gammasspectrometry in the field of pelitic rocks Bambuí Group in Curvelo in Minas Gerais. We used data obtained from digital aerial survey gammasspectrometry and magnetometry in order to characterize the spatial distribution of radionuclides (K, eU and eTh) and magnetic susceptibility, covering the central area of Minas Gerais. These data were processed and analyzed with Rapideye images, geological map, soil map, digital elevation model and slope map, in order to analyze them to evaluate the adequacy of gamma ray spectrometric and magnetic data to distinguish classes of soils region. To this end, we carried out the interpretation of the individual images of K, U (eU) and Th (eTh), seeking criteria for the delimitation of mapping units from these elements. The analysis and interpretation of data from the preparation of contour maps of K, eU and eTh enabled the understanding of the behavior and mobility of these radionuclides in various environmental compartments of the study area. The element K is adequate for the distinction of Cambisols and Latosols. Furthermore, we identified a statistically significant correlation between eU and eTh with clay content, both in the A horizon ($r^2 = 0.58$ and $r^2 = 0.51$) and B horizon ($r^2 = 0.56$ and $r^2 = 0.64$, $p < 0.05$). Allowing note that the content of eU and eTh are suitable for predicting the texture of the soil, corroborating the qualitative analysis. A positive and significant correlation between levels of eU and eTh and clay content distribution elements of eU and eTh concluded that these elements are not lithogenic, since they occur in very low concentrations in Cambisols. The magnetic data were efficient to define areas with a certain magnetization in Bambuí Group, probably related to the detection of extensive magnetic alignment that have been interpreted as diabase dikes dated from the Cretaceous period.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos sobre a distribuição espacial de solos no Estado de Minas Gerais ainda são incipientes e os mapas de solos disponibilizados, ou em elaboração, são geralmente generalizados. Diante disso, faz-se necessário o empenho na busca de novas técnicas de levantamento de solos via ferramentas do Sistema de Informações Geográficas (SIG's) que permitam tornar o mapeamento de solos mais rápido e menos oneroso, buscando a modelagem da distribuição das classes de solos na paisagem a partir do estabelecimento de padrões para a predição de informações sobre os solos.

O uso de técnicas que visam à predição espacial em mapeamento de solos e de seus atributos vem crescendo na última década, devido ao avanço nas ferramentas de SIG's. Estas ferramentas permitem usar de maneira mais rápida métodos matemáticos e estatísticos, os quais, já estão sendo aplicados à Ciência do Solo desde a década de 1960 (McBratney et al., 2000). Alguns estudos já avançaram nesse sentido, sendo que muitos desses tiveram sucesso em modelar a distribuição dos solos na paisagem, utilizando principalmente atributos do terreno (Chagas et al., 2010).

Entretanto, para áreas em que o relevo não consiste em bom estratificador de classes de solos devido à inexpressiva diferença altimétrica faz-se necessária a busca de novas técnicas de mapeamento, como por exemplo, a utilização de dados magnetométricos e gamaespectrométricos para a elaboração mais confiável, rápida e menos onerosa de mapas de solos.

Os dados gamaespectrométricos são obtidos a partir da radiação gama, que são comprimentos de onda caracterizados por alta energia no espectro eletromagnético. Esses dados constituem uma excelente ferramenta para o estudo de solos uma vez que 90 % dos raios gama são emanados nos primeiros 30 cm da superfície terrestre, camada onde os processos pedogenéticos são mais intensos. Esta profundidade compreende para a maior parte dos perfis de solos, o horizonte diagnóstico superficial (A) e parte do horizonte diagnóstico subsuperficial (B).

Os três radionuclídeos passíveis de medição compreendem o K, U e Th cujas concentrações médias na crosta equivalem a 2,0 - 2,3 dag kg⁻¹, 2,7 - 3,0 mg kg⁻¹ e 8,5 - 12,0 mg kg⁻¹, respectivamente (Dickson & Scott, 1997; Minty, 1997).

Dados gamaespectrométricos são produzidos a partir de métodos geofísicos que permitem a dosagem dos elementos químicos em subsuperfície. Esses dados computam o teor de K e equivalentes de U e de Th, os quais ocorrem naturalmente em solos e rochas. Esses radionuclídeos são os únicos que produzem raios gama em intensidade e energia suficientes para serem quantificados por gamaespectrômetros.

A concentração média de U na crosta terrestre é de 3 mg dm^{-3} . Sua ocorrência pode ser na forma U^{4+} ou U^{6+} . A forma mais reduzida ocorre em minerais mais estáveis e, a mais oxidada, associada a ânions nos carbonatos, sulfatos e fosfatos, formando espécies solúveis. O U ocorre nas rochas como uraninita, uranotorita, monazita e zircão. Em ambiente oxidante, o elemento U é hidrolisado, oxidado e lixiviado na forma de $(\text{UO}_2)^{2+}$ (Dickson & Scott, 1997).

O elemento Th pode ocorrer na alanita, monazita, xenotímeo e zircão, em concentrações maiores que 1000 mg dm^{-3} ou como traço em outros minerais constituintes de rochas. Ele é um elemento eletropositivo, com afinidade litófila, ocorrendo principalmente em óxidos, silicatos e fosfatos. Encontra-se em maior proporção na monazita e no zircão, sendo estáveis nesses minerais; assim, pode acumular-se. Durante o avanço da pedogênese, o Th, por apresentar baixa mobilidade, pode ser adsorvido pelos argilominerais, óxidos e hidróxidos de Fe, Al e Ti, principalmente na fração argila (Dickson & Scott, 1997).

As maiores fontes de K nos solos são os feldspatos potássicos e as micas. Em função da sua solubilidade e mobilidade há acentuada depleção do seu teor durante o avanço da pedogênese.

A utilização dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos tem sido difundida nas duas últimas décadas. Embora o uso desses dados geofísicos tenha sido proposto para prospecção mineral, já foram utilizados com sucesso em trabalhos referentes a estudos ambientais e pedológicos (Dickson & Scott, 1997; Becegato & Ferreira, 2005; Silva et al., 2010).

Nascimento et al. (2004), ao estudarem solos do Cerrado, concluíram que aqueles que apresentam textura mais argilosa e teores mais elevados de matéria orgânica apresentam maiores teores dos radionuclídeos comparativamente aos solos arenosos. Esses resultados corroboram com aqueles encontrados por Souza & Ferreira (2008), que ao estudar a relação dos fertilizantes fosfatados e a distribuição dos radionuclídeos no solo, constatou que estes tendem a se concentrar nos solos desenvolvidos de rochas básicas, que são naturalmente mais argilosos. Becegato & Ferreira (2005) observaram a mesma tendência ao avaliarem a distribuição dos radionuclídeos em solos cultivados

com soja, cana-de-açúcar e trigo, no noroeste do Paraná. Eles concluíram que, enquanto nos solos argilosos os radionuclídeos ficam retidos nos coloides, nos solos arenosos eles são facilmente perdidos por lixiviação. Ao estudar o intemperismo em rochas graníticas, Rebelo (2000) constatou a maior presença de radionuclídeos no solo mesmo após a atuação dos processos pedogenéticos.

Acredita-se que a associação entre os conhecimentos referentes à gênese de solos e à análise criteriosa sobre o padrão de distribuição dos radionuclídeos na paisagem, juntamente com as técnicas de SIG's, podem dinamizar a aquisição de informações pedológicas, tornando-as mais rápidas e precisas.

No presente trabalho, buscou-se caracterizar o comportamento gamaespectrométrico e magnetométrico no município de Curvelo-MG. Além disso, a partir da investigação geomorfológica, geológica e pedológica foi possível integrar informações geofísicas por meio da avaliação das relações da distribuição dos radionuclídeos com as unidades de mapeamento de solos e a litologia da área de estudo. Buscou-se ainda avaliar o relacionamento entre os dados gamaespectrométricos e magnetométricos com os atributos químicos e físicos dos solos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Princípios da Gamaespectrometria

Os elementos que emitem radiação são chamados radionuclídeos (nuclídeos radioativos) ou isótopos radioativos. A síntese desses elementos, por relacionar-se à origem do sistema solar, faz com que pertençam às séries radioativas naturais (Minty, 1997).

Os radionuclídeos estão sujeitos à lei do decaimento radiativo, ou seja, o seu núcleo pode emitir uma partícula alfa e uma partícula beta e, ao retornar ao seu estado normal, pode emitir raio gama. Por causa disso, o decaimento é considerado fenômeno estatístico sujeito à probabilidade de um átomo desintegrar-se na unidade de tempo (Mernagh & Miezitis, 2008).

Os tipos de energias emitidos pelos radionuclídeos variam de acordo com o tipo de energia penetrativa. Dessa forma, as partículas alfa (α) apresentam energia pouco penetrativa, sendo barrada por uma fina lâmina de papel, causando ionização no ar. As partículas beta (β) apresentam maior energia penetrativa que permite a ionização do ar por alguns centímetros, e podem atravessar uma lâmina metálica com poucos milímetros de espessura. Os raios gama (γ) apresentam maior energia penetrativa, sendo capazes de penetrar em até 30 cm em rochas e dezenas de metros no ar. Como não apresentam carga, não são desviados por campos elétricos ou magnéticos e exibem, por isso, as características de uma onda eletromagnética. Os raios γ encontram-se na faixa do espectro eletromagnético de curto comprimento de onda, apresentam a velocidade da luz e para as pesquisas de interesse geológico são utilizados os espectros de energia entre 0,2 e 3,0 MeV (Minty, 1997).

Na Terra, os elementos K, eU e eTh são os únicos de ocorrência natural que são capazes de emitir raios γ com energia suficiente que permite a detecção em levantamentos aerogamaespectrométricos. O teor médio desses elementos na crosta terrestre são em média: 2,0 dag kg⁻¹ para K; 2,7 mg kg⁻¹ para eU e 8,5 mg kg⁻¹ para eTh (Minty, 1997).

Os raios γ emitidos a partir da superfície do solo refletem primeiramente a composição mineralógica e geoquímica da rocha, e, posteriormente, os minerais secundários, produtos do intemperismo. Wilford et al. (1997) afirmam que o intemperismo modifica a distribuição e concentração dos radionuclídeos na rocha original.

Uma vez que a resposta dos radionuclídeos na rocha e nos materiais intemperizados é compreendida, os dados gamaespectrométricos podem fornecer informações sobre processos geomórficos e pedológicos, incluindo sua mineralogia, textura e química. Entretanto, tais inferências devem ser feitas com cautela, pois os solos mais intemperizados podem apresentar respostas distintas relativas aos teores de radionuclídeos, mesmo quando se trata do mesmo material de origem. Por outro lado, solos que ocorrem em paisagens mais movimentadas, com erosão ativa, apresentam respostas de radionuclídeos correlacionadas com a geoquímica e a mineralogia do material de origem preservadas (Wilford et al., 1997).

Portanto, quando os solos são formados a partir do mesmo material de origem, o conhecimento referente à resposta espectral deste material permite ao intérprete inferir sobre o equilíbrio de desnudação da paisagem a partir do balanço relativo às taxas de erosão e de pedogênese. Entretanto, para cada área de estudo, um modelo conceitual deve ser criado devido às diferenças litológicas e a história geoquímica do intemperismo (Wilford et al., 1997).

Interação da Radiação Gama com a Matéria

A radiação ionizante caracteriza-se por sua capacidade de ionizar o meio que atravessa. Com isso, a determinação dos teores dos radionuclídeos depende da interação da radiação γ com a matéria que pode ocorrer de três formas: efeito fotoelétrico, produção de par (elétron-pósitron) e espalhamento Compton (Minty, 1997).

No efeito fotoelétrico há interação entre o fóton e o átomo. O fóton retira do átomo um elétron interno – maior probabilidade das camadas K e L – passando a haver um íon excitado que é absorvido pelo meio sendo toda a energia do fóton transferida para o meio (Minty, 1997; Okuno & Yoshimura, 2010).

O espalhamento Compton refere-se ao espalhamento do fóton por um elétron do meio, considerado livre. Como consequência da interação, a energia do fóton incidente é dividida entre o elétron e um fóton espalhado, de menor energia que o original e que se propaga em outra direção. O espalhamento Compton consiste de um processo em níveis moderados de energia, predominante no intervalo de energia que interessa aos levantamentos aerogamaespectrométricos (Minty, 1997; Okuno & Yoshimura, 2010).

A forma conhecida como criação de par (elétron-pósitron) é o efeito que predomina quando a energia do fóton é alta, pois é o único processo de interação de fótons com o meio cuja, seção de choque cresce continuamente com a energia do fóton.

Refere-se à conversão de toda a energia do fóton em massa de repouso e energia cinética de um par de partícula (elétron) e sua antipartícula (pósitron). Ocorre geralmente em níveis energéticos superiores a 1,02 MeV em que predomina alta energia, particularmente em elementos de elevado número atômico (Minty, 1997; Okuno & Yoshimura, 2010).

Medidas espectrométricas

A espectrometria é o ramo da ciência que trata da medida de espectros. Ela pode ser entendida como processo baseado na interação da radiação γ emitida pela amostra com o detector, possibilitando a discriminação qualitativa e quantitativa dos radioisótopos presentes na amostra (Andrade & Abreu, 2001).

A possibilidade de detecção dos raios γ é relativamente recente, uma vez que até a década de 1950 não havia detectores capazes de distingui-los, ou seja, só era possível detectar a contagem total. A partir do surgimento do detector feito com iodeto de sódio, com sensibilidade necessária para a distinção do registro de pulsos proporcionais à energia da radiação γ , foi possível a detecção discriminada (Minty, 1997).

Segundo Wilford et al. (1997), o fato dos raios γ serem emitidos em diferentes níveis ou picos energéticos de radioisótopos particulares permite estimar a abundância relativa ou a concentração destes elementos no solo e na rocha, pela intensidade dos picos de emitância.

O K é medido diretamente pelo pico correspondente ao decaimento de isótopos de ^{40}K , que emite raios γ , pois decai para ^{40}Ar que, devido à sua maior abundância crustal, tem a concentração normalmente expressa em percentagem (dag kg^{-1} K) (Wilford et al., 1997; Mernagh & Miezitis, 2008).

O K é identificado e quantificado pela absorção de energia de 1,46 MeV, correspondente ao isótopo ^{40}K . Em relação ao Th e ao U, suas concentrações são determinadas indiretamente pela medição da radiação γ emitida por núclídeos radiogênicos (filhos) pertencentes às séries de decaimento. O U é detectado pela energia de 1,76 MeV, correspondente à absorção do bismuto ^{214}Bi da série do ^{238}U . O Th é identificado pela energia de absorção 2,62 MeV pelo tálio ^{208}Tl (Minty, 1997). Como as medidas de U e de Th são obtidas indiretamente, são denominadas equivalente de tório (eTh) e equivalente de urânio (eU).

O U ocorre naturalmente como radionuclídeo ^{238}U e ^{235}U , e sua série radioativa termina nos isótopos estáveis ^{206}Pb e ^{207}Pb , respectivamente. A série radioativa do Th

termina no isótopo estável ^{208}Pb . A determinação dos teores de Th e U são mais complexas, uma vez que ^{232}Th e ^{238}U apresentam decomposição por meio de uma série de núclídeos filhos até atingirem isótopos estáveis de Pb. Por isso, as concentrações de Th e U são geralmente expressas em partes por milhão (equivalentes eU e eTh), o que indica que suas concentrações são inferidas a partir de elementos filhos em sua cadeia de decaimento (Minty, 1997).

O princípio das determinações aerogamaespectrométricas baseia-se na interação da energia emitida pela amostra com o material sensível do detector. O sistema detecta o efeito causado pelos pulsos que são gerados. Posteriormente, estes pulsos são amplificados e discriminados no analisador multicanal, que os coloca armazenados em determinados canais, gerando como resultado final um espectro. Esta quantificação é possível a partir do ajuste das energias dos espectros com uma fonte padrão, pois os comprimentos de onda são específicos para cada elemento e suas intensidades são proporcionais à concentração do elemento na amostra, sendo expressa a partir da conversão das energias detectadas em contagem por segundo para unidade de massa em dag kg^{-1} para o K ou em mg kg^{-1} para o eU e eTh (Minty, 1997).

A exatidão na quantificação dos teores dos radionuclídeos nas amostras por aerogamaespectrometria é susceptível a inúmeras variáveis, entre elas, os equipamentos e a altura do levantamento. De acordo com Minty et al. (1997) em relação aos equipamentos, a variação quanto ao volume do cristal, a eficiência do detector e as larguras das janelas influenciam as contagens, tornando difícil a comparação de resultados de dois levantamentos diferentes. Algumas medidas podem passar por correções relacionadas à redução da radiação do fundo atmosférico, correções altimétricas, correção do tempo morto e conversão dos dados obtidos em contagem por segundo para partes por milhão ou percentagem.

A exatidão quanto à altura do levantamento, juntamente com o espaçamento da linha de vôo da pesquisa, determina a resolução dos dados aerogamaespectrométricos. Baixa altura de vôo, juntamente a menores espaçamentos entre as linhas de vôo consistem em melhor resolução dos dados (Minty, 1997).

Como regra geral, a altura do vôo é de 100 m. Os vôos para pesquisas são feitos em 1,5 km, 400 m e 100 m de espaçamento entre linhas úteis para escala de mapeamento de 1:250.000, 1:100.000 e 1:50.000, respectivamente (Wilford et al., 1997).

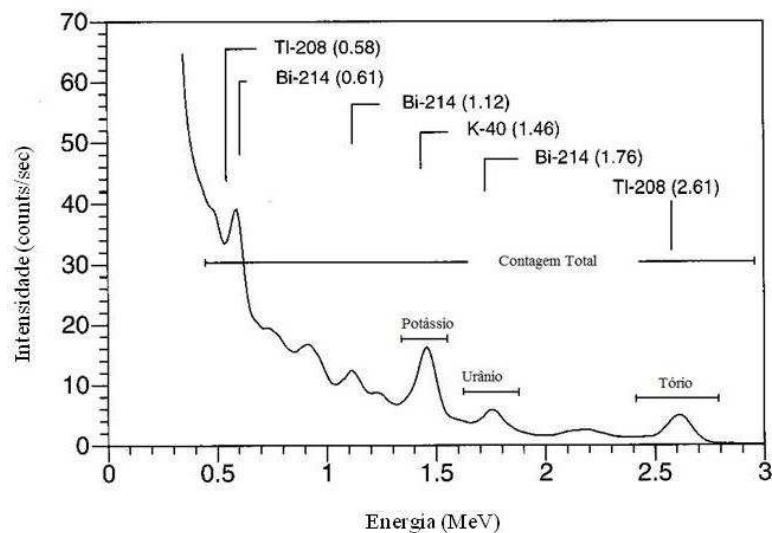


Figura 1. Medidas aerogamaespectrométricas de K, eU e eTh. Fonte: Minty et al., (1997).

Interferências nas determinações aerogamaespectrométricas

Fatores ambientais podem influenciar as medidas aerogamaespectrométricas, entre elas citam-se: sobrecargas não radioativas, temperatura do ar e pressão, precipitação pluvial, camada de inversão de temperatura, movimentos do ar, umidade do solo e vegetação (Minty, 1997; Wilford et al., 1997; Laedermann et al., 1998).

A radiação emitida pela superfície terrestre pode ser reduzida significativamente quando a densidade vegetal é elevada. Apenas 2 cm de cobertura, por exemplo, podem reduzir a radiação em até 35 %. Em algumas áreas, vegetações densas podem ter a mesma capacidade de bloquear a fonte de radiação como se o detector estivesse a 50 m de altura. Entretanto, estudos de rochas e solos na Austrália, em região de densa cobertura vegetal constataram, a não interferência da cobertura na detecção dos dados gamaespectrométricos (Wilford et al., 1997; Laedermann et al., 1998).

A umidade do ar pode alterar a densidade da atmosfera, levando a redução do fluxo de radiação da superfície. Para garantir exatidão nas determinações, Wilford et al. (1997) aconselham que o levantamento aerogamaespectrométrico seja realizado quando o solo estiver em condições de baixa umidade, em que a água do solo encontra-se retida a -1500 kPa, ou seja, a pressão é menor que a pressão atmosférica.

De acordo com Minty (1997), existem quatro tipos de fontes de radiação do background: fluxo atmosférico do radônio e background cósmico, produtos oriundos de explosões atômicas e acidentes nucleares. Existe ainda o background da aeronave, ou seja, alguma proporção insignificante de radionuclídeos na aeronave ou no próprio detector. Numa tentativa de minimizar estas interferências, Minty et al. (1997) estudaram alguns métodos capazes de corrigir os dados, tais como: nivelamento convencional, usando-se linhas de controle; informações de correlação entre os canais e micronivelamento.

Comportamento geoquímico dos radionuclídeos K, eU e eTh

A similaridade de ocorrência do eU e eTh no ambiente decorrem da semelhança que ambos apresentam em relação ao raio iônico. Além disso, o raio iônico desses elementos é similar ao do zircônio (Zr) e do cério (Ce), o que possibilita a ocorrência de substituição isomórfica (Quadro 1). Por isso, são frequentes as trocas de Zr por Th, em minerais de zircão; Ce e outros lantanídeos por Th, na maioria de minerais terras raras; U por Th, na torianita (ThO_2) e na torita (ThSiO_4) (Boyle, 1982).

O Th e U são quimicamente similares em temperaturas elevadas, por isso ocorrem juntos em rochas ígneas ácidas e depósitos hidrotermais. No ambiente, o U é quimicamente mais móvel. A menor mobilidade do Th se deve à limitada estabilidade dos complexos formados entre o Th^{4+} , especialmente com carbonatos (Mernagh & Miezitis, 2008).

Quadro 1. Características de alguns elementos químicos

Elementos	Raio Iônico Å	Valência
U	0,95	+6
Th	0,98	+4
Ca	0,99	+2
Li	0,83	+1
Na	0,97	+1
K	1,33	+1

Fonte: (Raij, 1983)

A solubilidade da maior parte dos elementos e a estabilidade dos minerais depende significativamente do pH. A maior parte dos elementos é solúvel em solução ácida. O aumento do pH faz com que os elementos precipitem na forma de hidróxidos ou sais básicos. Portanto, o pH controla o acúmulo e a lixiviação dos elementos. O pH de hidrólise do U é 4,2 e do Th é 3,5 (Langmuir & Herman, 1980).

Os elementos Th e U são tipicamente menos móveis do que o K. Devido aos processos de formação e mobilidade apresentados, na avaliação de dados gamaespectrométricos, Th e U concentram-se em materiais residuais (Wilford et al., 1997).

Urânio

A presença do U é constatada em rochas cuja constituição mineralógica dá-se basicamente por óxidos, silicatos, uranita (UO_2), monazita $[(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4]$ e o zircão (ZrSiO_4). Sua concentração na crosta terrestre é, em média, de 3 mg kg^{-1} , podendo ocorrer em dois estados de valência, U^{4+} e U^{6+} . A mobilidade do U^{6+} é reduzida pela adsorção a óxidos, minerais de argila e coloides, como também pela redução a U^{4+} quando se encontra em ambientes redutores. Contrariamente, a forma oxidada, o U^{6+} , complexa-se formando espécies solúveis com ânions como os carbonatos, sulfatos e fosfatos (Figura 2) (Dickson & Scott, 1997).



Figura 2. Ciclo das interações do U. Fonte: Boyle, 1982, adaptado por Ferreira & Souza (2002).

Tório

O Th pode ocorrer na forma de óxidos, silicatos, carbonatos e fosfatos, ocorrendo também em alguns compostos orgânicos como húmus, petróleo e carvão (Mernagh & Miezitis, 2008). A ocorrência de Th é geralmente em concentrações muito baixas, uma vez que sua própria ocorrência na crosta é pequena, em torno de $10,5 \text{ mg kg}^{-1}$.

Em termos de ocorrência, a monazita $[(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4]$, torianita (ThO_2), torita (ThSiO_4) e torogumita $[\text{Th}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}]$ são os principais minerais que contêm Th. Além disso, o Th também pode ser encontrado, ainda que em menores quantidades, na alanita, bastnasita, pirocloro, xenotime, fluorapatita e zircônio (Mernagh & Miezitis, 2008). A ocorrência é mais comum em dois estados de oxidação Th^{3+} e Th^{4+} , sendo este último o de maior probabilidade de ocorrer na natureza (Boyle, 1982). A solubilidade de complexos de Th é geralmente baixa, exceto em soluções ácidas. Entretanto, compostos orgânicos, como os ácidos húmicos, podem aumentar a solubilidade do Th em condições de pH neutro (Mernagh & Miezitis, 2008).

Esses minerais são estáveis durante o intemperismo e podem acumular-se em depósitos de minerais. O Th liberado durante o intemperismo pode ser retido em óxidos e hidróxidos de Fe ou Ti e em argilominerais (Figura 3). Como o U, o Th pode também ser transportado; a mobilidade do Th ocorre devido à fixação em coloides, à medida que são incorporados à solução do solo ou ainda quando formam complexos solúveis com sulfatos, nitratos, carbonatos, fosfatos, silicatos, dentre outros (Dickson & Scott, 1997).



Figura 3. Ciclo das interações do Th. Fonte: Boyle, 1982; adaptado por Ferreira & Souza (2002).

Potássio

Na crosta terrestre, o teor de K é em média $2,31 \text{ dag kg}^{-1}$. Os minerais fontes de K em rochas, de maior ocorrência, são muscovita, biotita e feldspatos potássicos. De modo geral, o elemento é despreendido dos minerais primários facilmente em função do seu raio iônico e mobilidade. Posteriormente, ele é adsorvido em argilominerais como illita e, dependendo do ambiente de formação, na montmorilonita. O K é móvel e solúvel na maioria das condições de intemperismo (Wilford et al., 1997).

A ocorrência dos elementos nas rochas ígneas varia em função da natureza do magma em que são formadas. Rochas félsicas são formadas de magmas ácidos e apresentam maior proporção de K, por outro lado, as rochas básicas, formadas de magmas básicos, são naturalmente pobres (Sial & McReath, 1984).

O K detectado em levantamentos aerogamaespectrométricos em solos geralmente está relacionado aos minerais nos quais faz parte de sua estrutura, como nas micas, nos feldspatos potássicos e nas illitas, assim como em solos em que há possibilidade de formação de argilominerais expansivos, como a montmorilonita. Além disso, óxidos de ferro, hidróxidos de alumínio e argilominerais podem reter o elemento em suas superfícies dependendo das condições do meio, principalmente em relação ao pH (Lindsay, 1979).

Distribuição dos radionuclídeos em rochas e solos

Willford et al. (1997) comentam que os teores dos radionuclídeos em rochas ígneas básicas são menores, assim como em rochas carbonáticas, comparativamente às rochas sedimentares e rochas ígneas félsicas. A maior abundância de K nas rochas ígneas félsicas (granitos, gnaisses), geralmente é acompanhada por teores relativamente maiores de U e Th. De acordo com Mernagh & Miezeitis (2008), com o aumento do metamorfismo os teores dos elementos tendem a diminuir.

Devido à própria natureza de formação das rochas sedimentares os teores de Th e U neste grupo de rochas apresentam certa variabilidade (Quadro 2). Neste grupo, os arenitos apresentam os menores teores, provavelmente em função da maior presença de quartzo nestas rochas.

Os radionuclídeos U e Th apresentam ampla diversidade em sua distribuição em relação às rochas (Quadro 2).

Quadro 2. Teores de eTh e eU em diferentes tipos de rochas

Tipo de rocha	eTh	eU	Th/U
	----- mg kg ⁻¹ -----		
Rochas ígneas			
Ultrabásicas (periodotito, dunito, etc.)	0,1	0,02	5
Kimberlitos	12	4,5	2,6
Lamprófiros	15	5	3
Extrusivas (basalto, gabro, etc.)	3	0,6	5
Ígneas intermediárias (diorito, andesito, etc.)	5	2	2,5
Intrusivas ácidas (granito, riolito, etc.)	15	4,5	2,5
Sienitos ricos em álcali, álcali granitos, etc.	> 100	> 100	1
Rochas sedimentares			
Arenitos, grauvacas, conglomerados	5	1,5	3,3
Folhelhos, argilitos	12	3,5	3,4
Folhelhos pirobetuminosos	> 20	> 1200	
Lignina, carvão	> 100	> 1000	
Formação ferrífera bandada	3	2	1,5
Anidrita, gipsita	0,2	0,1	2
Tufos (composição ácida e intermediária)	6	3	2
Fosforita (oceânica)	> 12	> 300	
Rochas metamórficas			
Quartzitos, meta-grauvacas, meta-conglomerados	5	1,5	3,3
Mármore e metadolomitos	1	0,5	2
Xistos (ortoderivados)	6	2	3
Xistos (paraderivados)	10	2	5
Anfibólios	2	0,5	4
Greenstone (meta-andesito, meta-basalto)	2	0,5	4
Gnaisses e granulitos	10	3	3,3
Serpentinitos	0,1	0,02	5

Fonte: Boyle, 1982.

Em estudos realizados na Austrália, Willford et al. (1997) constataram que o incremento dos radionuclídeos apresenta correlação com o aumento de silício corroborando trabalhos anteriores que indicaram que as rochas ígneas, principalmente as rochas ígneas félsicas, apresentam teores de radionuclídeos mais elevados. Geralmente, nestas rochas os teores de eTh são bem maiores do que os de eU (Dickson & Scott, 1997; Mernagh & Miezitis, 2008; Silva et al., 2010).

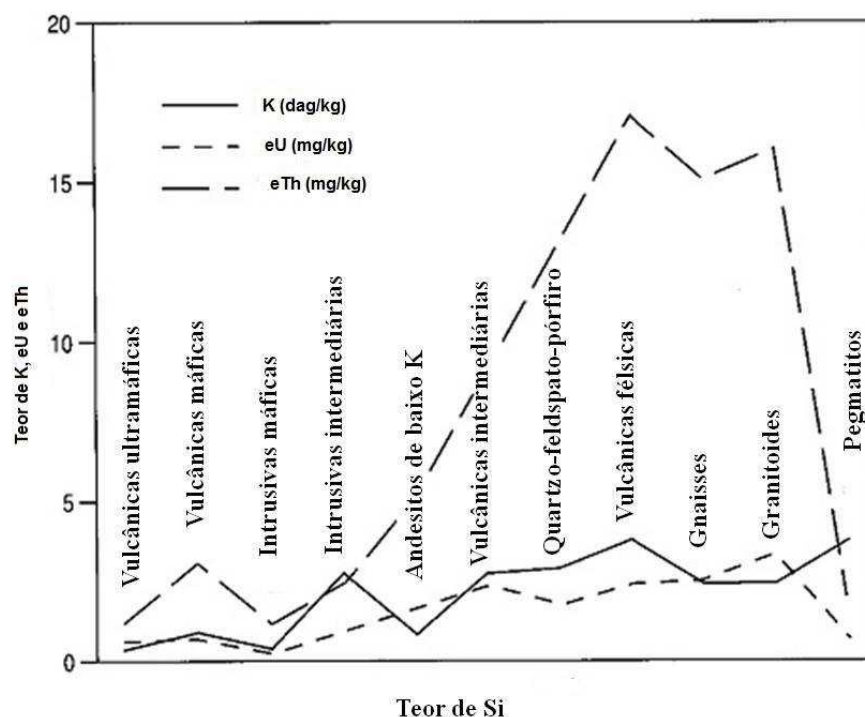


Figura 4. Variação média do conteúdo de K, eU e eTh de acordo com o aumento do teor de sílica em rochas ígneas. Fonte: Adaptado de Dickson & Scott (1997).

Apesar de possíveis previsões da ocorrência de radionuclídeos nas rochas não há possibilidade de se prever uma dada concentração para cada tipo de rocha, porque há muita variação dentro de uma mesma classe. Por isso, não é possível estabelecer uma classificação petrográfica com base nas concentrações de radionuclídeos (Dickson & Scott, 1997) (Quadro 3).

Quadro 3. Teores de K, eU e eTh em rochas e solos na Austrália por métodos gamaespectrométricos

Tipo de rocha	Rocha			Solo		
	K	eU	eTh	K	eU	eTh
	dag kg ⁻¹	---- mg kg ⁻¹ ----		dag kg ⁻¹	---- mg kg ⁻¹ ----	
Rochas sedimentares						
Folhelhos do Arqueano	0,4 – 1,6	0,3 – 1,3	1 – 5	0,8	1,2	3,0
Outros folhelhos	0,1 – 4,0	1,6 – 3,8	10 – 55	0,7 – 3,0	1,2 – 5	6 – 19
Arenitos	0,0 – 5,5	0,7 – 5,1	4 – 22	0,1 – 2,4	1,2 – 4,4	7 – 18
Carbonatos	0,0 – 0,5	0,4 – 2,9	0 – 2,9			
Rochas ígneas intrusivas						
Granitóides	0,3-4,5	0,4-7,8	2,3-45	0,4-3,9		
Gnaisse	2,4-3,8	2,1-3,6	18-55	0,7-1,9	1,6-3,8	6-19
Pegmatitos	2,6-5,5	0,3 – 1	0,3 – 9,6			
Aplitos	0,6 – 4	1 – 8	3 – 20			
Quartzo-feldspático	1-5	1,3 – 2,9	6 – 14			
Intrusivas intermediárias	0,7 – 5,6	0,1 – 1,2	0,8 – 6,1	0,7 – 3,4	1,5 – 2,3	2,9 – 8,4
Máficas intrusivas	0,1 – 0,8	0,0 – 1,1	0,0 – 3,1			
Rochas ígneas extrusivas						
Vulcânicas félsicas	2,0 – 4,4	1,4 – 13	13 – 28	1,8 – 3,2	1,3 – 2,4	10 – 18
Vulcânicas intermediárias	1,8 – 4,1	0,9 – 5,6	1,5 – 15	1,0 – 2,7	1,2 – 3,6	4 – 17
Andesitos com baixo K	0,7 – 0,9	1,0 – 2,5	3 – 8	0,8 – 1,5	1,2 – 1,5	4 – 6
Vulcânicas máficas	0,3 – 1,3	0,3 – 1,3	2,0 – 5,0	0,2 – 1,4	0,6 – 2,5	3,3 – 13
Vulcânicas ultramáficas	0,2 – 0,9	0,3 – 0,9	0,0 – 4,0	0,6	2,0	6,0

Fonte: (Dickson & Scott, 1997)

O processo de formação das rochas sedimentares baseia-se na deposição de sedimentos favorece a variabilidade mineralógica, sendo assim os teores de radionuclídeos são igualmente variados. De acordo com (Dickson & Scott, 1997), uma vez que as rochas sedimentares refletem o material de origem, em sedimentos pré-intemperizados são esperados baixos teores de radionuclídeos comparativamente a sedimentos imaturos, nos quais se espera teores de radionuclídeos mais elevados.

O eTh apresenta valores entre 0,1 a 50,0 mg kg⁻¹ nos solos, sendo a média de aproximadamente 5,0 mg kg⁻¹. Teores mais elevados deste elemento (acima de 200,0 mg kg⁻¹) podem estar presentes em argilas, lateritas, bauxitas, carbonatitos e proximidades de pegmatitos (Mernagh & Miezitis, 2008).

O avanço do intemperismo condiciona a perda dos radionuclídeos K, eU e eTh. Entretanto, pelas condições geoquímicas, estes últimos são mantidos por mais tempo, especialmente o eTh que apresenta menor mobilidade comparativamente ao K e eU (Boyle, 1982). Uma vez que esses radionuclídeos apresentam mobilidades distintas, a análise dos teores destes elementos deve ser feita levando-se em consideração a história geoquímica do material de origem, bem como aos solos dessas originados (Wilford et al., 1997).

Para solos do Grupo Bambuí, a partir do projeto de geologia Sete Lagoas - Abaeté, o uso de dados aerogamaespectrométricos possibilitaram descrever a intensidade do sinal para cada elemento em função da litologia (Tuller et al., 2010) (Quadro 4).

Quadro 4. Discriminação de unidades litoestratigráficas da Folha Sete Lagoas-Abaeté por avaliação semi-quantitativa de intensidade de radiação dos canais K, eU, eTh e Contagem total

Unidade		Litologia dominante	Ct ^{1/}	Intensidade do sinal		
Nome	Sigla			K	eU	eTh
Coberturas Detrito-Lateríticas	Ndl	Latossolos, sedimentos argilo-sílticos vermelho escuros com concreções ferruginosas e níveis de cascalho	alto	baixo	alto	alto
Formação Serra de Santa Helena	NP2sh	Siltitos e argilitos com níveis de arenitos finos a muito finos	baixo	alto	médio	médio
Formação Serra da Saudade	NP2ss	Siltitos e argilitos com níveis de arenitos finos e muito finos	médio	médio	médio	médio
Sedimentos Aluviais	N4a	Sedimentos inconsolidados de natureza arenosa, areno-argilosa, argilo-síltica contendo localmente seixos e matacões	médio	alto	baixo	baixo
Formação Lagoa do Jacaré	NP2lj	Calcarenitos finos a médios, com níveis oolíticos e de intraclastos, intercalados com calcissiltitos, margas e siltitos, localmente níveis dolomitizados e níveis de chert preto	médio	alto	baixo	baixo
Formação Sete Lagoas, Membro Lagoa Santa	NP2sls	Calcarenitos finos a médios, com níveis dolomitizados, eventualmente com estromatólitos e intraclastos.	médio	médio	baixo	baixo

^{1/} Ct – Contagem total. Fonte: (Tuller et al., 2010).

Aplicações da gamaespectrometria

Os métodos geofísicos consistem em importantes ferramentas para a aquisição de informações que auxiliem o conhecimento sobre as rochas e os solos. São métodos cuja medição de campo produzida por fontes naturais e que podem ser medidas a partir de plataformas aerotransportadas, como é o caso da emissão natural das radiações gama. Dados aerogamaespectrométricos são frequentemente utilizados com sucesso em mapeamentos geológicos com o intuito de atender a indústria minerária, uma vez que estes são eficientes na produção informações sobre as unidades litológicas aflorantes (Wilford et al., 1997; Elawadi et al., 2004; Teixeira et al., 2006; Silva et al., 2010).

Estudos feitos nas bacias dos rios Camamu e Almada, na Bahia, utilizaram estes dados para medir calor radiogênico buscando informações para a indústria petrolífera, em seus trabalhos de prospecção. Constatou-se que áreas de maior calor radiogênico são condizentes com maiores teores de radionuclídeos (Sapucaia et al., 2005).

Neto & Ferreira (2003) constataram a possibilidade de uso dos dados gamaespectrométricos para prospecção mineral. Em Botuverá-SC, estes autores detectaram altos teores de K que estavam associadas às áreas auríferas.

Alguns trabalhos têm utilizado a gamaespectrometria na área de solos especialmente quando se trata de avaliação da contaminação de solos após uso contínuo de fertilizantes. Inicialmente, muitos estudos foram realizados buscando correlações entre os radionuclídeos e os fertilizantes fosfatados, devido à notável concentração de urânio na apatita (Nir-El et al., 1998; Becegato & Ferreira, 2005; Becegato et al., 2008; Souza & Ferreira, 2008). Estudos de solos no Paraná concluíram que a susceptibilidade magnética e o teor dos radionuclídeos apresentaram correlação com o teor de argila (Becegato & Ferreira, 2005). Outros trabalhos constataram correlação altamente significativa entre os radionuclídeos, material de origem, mineralogia e a geoquímica (Pérez et al., 1998; Souza & Ferreira, 2008; Hermann et al., 2010).

Algumas pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de avaliar a possibilidade dos dados radiométricos auxiliarem na predição de algumas propriedades dos solos, o que levaria possivelmente à distinção de diferentes classes de solos e ao mapeamento de solos (Taylor et al., 2002; Becegato & Ferreira, 2005; Hermann et al., 2010; Erbe et al., 2012).

Em solos da Austrália, observou-se correlação positiva entre a contagem total dos radionuclídeos e a percentagem de argila, constatando-se que os dados

radiométricos podem ser eficientes na distinção de solos argilosos daqueles em que há presença de cascalho nos primeiros 10 cm do solo (Taylor et al., 2002).

Wilford et al. (1997) salientaram a potencialidade de utilização dos dados gamaespectrométricos no mapeamento de solos, principalmente em solos com textura mais arenosa, em razão da ausência destes radionuclídeos no quartzo. Erbe et al. (2012) realizaram o mapeamento de solos na Tailândia a partir de dados radiométricos e da litologia. Esses autores consideraram que os elementos radioativos são eficientes na predição sobre o estágio de intemperismo, bem como de algumas propriedades dos solos. Para a área estudada por aqueles autores, a avaliação não foi satisfatória em Gleissolos. Os autores consideraram a necessidade dos dados gamaespectrométricos serem avaliados juntamente à um modelo digital de elevação para obtenção de maior sucesso na distinção de classes de solos.

Hermann et al. (2010) buscaram quantificar os radionuclídeos e compará-los com solos e litologia na Tailândia. Eles concluíram que os teores dos radionuclídeos são adequados para a distinção de classes de solos e de rochas e consideraram o método promissor uma vez que podem vir a substituir o alto custo das análises químicas. No quadro 5 encontram-se os resultados obtidos para cada classe de solo analisada. Entretanto, esses autores apontaram que a análise de somente um dos elementos não fornece informação suficiente para a discriminação de classes de solos. Todavia, encontraram resultados satisfatórios na separação de Acrisols de Alisols com base na análise de dados radiométricos.

Quadro 5. Teores de K, eU e eTh detectados em vários tipos de rochas e classes de solos da Tailândia

Tipo de rocha/solo	Nº de amostras	K	eU	eTh
		dag kg ⁻¹	----- mg kg ⁻¹ -----	
Limestone	21	0,2±0,1	2,0±0,9	4,0±2,7
Alisols	42	1,8±0,9	4,5±1,4	15,4±4,1
Acrisols	105	0,6±0,2	7,1±2,2	27,8±5,1
Ferrasols	27	0,4±0,2	7,4±1,9	25,2±5,5
Umbrisols	21	0,8±0,2	6,4±2,1	23,1±4,2
Claystone	6	2,5±0,2	3,8±1,7	12,9±1,2
Luvisols	90	2,1±0,5	4,0±1,4	16,0±2,5
Alisols	258	2,2±0,5	4,5±1,7	16,4±3,2
Umbrisols	75	2,8±0,7	4,7±1,5	15,4±4,1
Latitite	1	17	9	131
Cambissols	19	2,1±0,8	1,2±0,6	3,4±1,1
Luvisols	30	1,6±0,4	3,9±0,9	1,6±0,7
Freshwater limestone	3	0,1±0,1	0,7±0,4	1,4±0,7
Chernozems	39	0,7±0,3	1,9±1,0	5,0±3,0

Fonte: Hermann et al. (2010)

Hermann et al. (2010) criaram um modelo conceitual para análise do mapeamento de solos elaborado na Tailândia, considerando que há um aumento na intensidade do sinal de eU e eTh durante a atuação da pedogênese, devido ao enriquecimento relativo em componentes de óxidos de Fe e hidróxidos de alumínio (Figura 4 e 5).

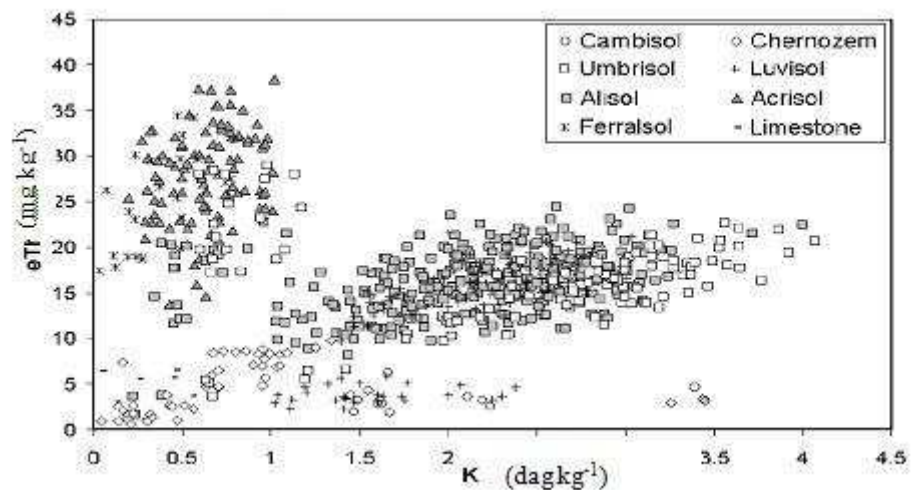


Figura 5. Dispersão das medidas aerogamaespectrométricas de K e eTh separadas por classe de solo e rochas. Fonte: Hermann et al. (2010)

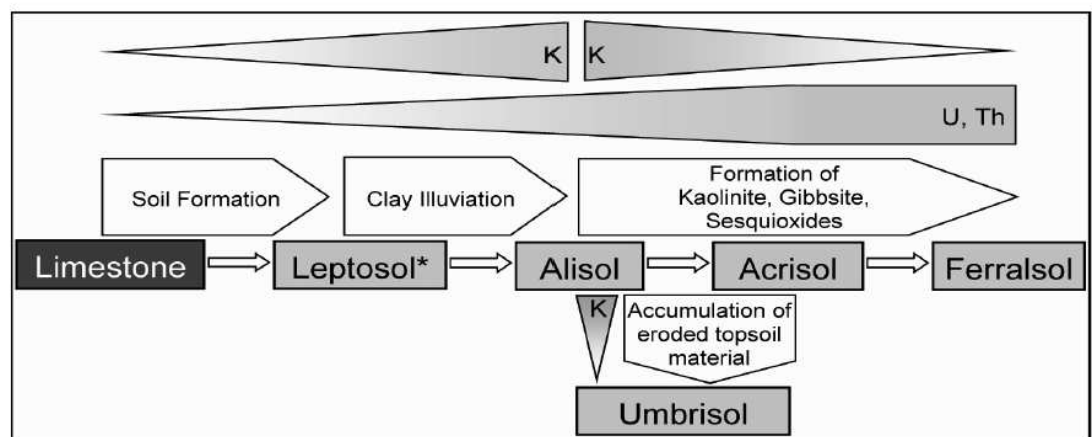


Figura 6. Modelo de análise de mapeamento de solos. Fonte: Hermann et al. (2010).

Estudos de solos na Austrália demonstraram variações significativas nas proporções de K em rocha e solos, refletindo a perda deste elemento por lixiviação após a atuação da pedogênese, concomitantemente ao enriquecimento de eU e eTh, devido à retenção destes elementos nos óxidos de ferro, argilominerais e minerais resistentes nos solos originados e basalto e diorito (Dickson & Scott, 1997). Estes autores encontram o dobro destes elementos nos solos em relação à proporção encontrada na rocha.

Princípios da Magnetometria

Os estudos sobre magnetismo iniciaram por volta de 1600, devido ao primeiro tratado, “De Magnete”, no qual Terra é comparada a um grande magneto. Comumente a referida magnetização correlaciona-se a chamada “magnetita” em torno da qual há controvérsias em relação ao nome. Alguns estudos relatam que a constituição do nome data em que um pastor chamado Magnes encontrou um óxido de ferro com propriedades magnéticas. Outros estudos afirmam que este nome deve-se a uma região da Turquia chamada Magnésia. Entretanto, apenas no século XX, sua medição passou a ser mais amplamente difundida a partir do surgimento da mecânica quântica (Cullity & Graham, 1972).

Essa medição tornou-se possível, em grande escala a partir da magnetometria que é uma importante técnica empregada pela Geofísica. É uma técnica usada para se determinar a resposta característica de uma amostra quando submetida à aplicação de um campo magnético, caracterizando-se por ser um método não invasivo. O surgimento da magnetometria data do início do século XXI, com o intuito de facilitar os mapeamentos necessários à exploração do petróleo. Uma vez que esta técnica é eficiente em separação de rochas ígneas e metamórficas de rochas sedimentares (ONIP, 2003).

O princípio da magnetometria é a determinação de anomalias em materiais ferromagnéticos. Tal técnica torna possível o mapeamento de estruturas geológicas em subsuperfície. Essa técnica deve-se à variabilidade da susceptibilidade magnética existente em algumas rochas e solos que causam variações no campo magnético terrestre (anomalias), uma vez que estas tendem a se magnetizarem com maior intensidade, podendo ser positiva e, em outros, negativa, refletindo a intensidade da magnetização em relação ao campo. A magnetometria vem sendo utilizada amplamente por possibilitar a obtenção das informações de forma rápida, eficiente e ser muito útil nas pesquisas relacionadas à prospecção mineral. Geralmente tais demandas são atendidas através da elaboração de levantamentos aeromagnéticos (Codemig, 2010).

O primeiro levantamento aerogeofísico realizado no Brasil foi em 1953, pela empresa Prospec, na região do município de São João Del Rei, em Minas Gerais (Hildebrand, 2004). Neste levantamento utilizaram as técnicas de gamaespectrometria e magnetometria. Tratava-se ainda de um sistema totalmente analógico.

A obtenção de dados magnéticos por magnetometria tem sido utilizada com frequência, uma vez que esta técnica possibilita a aquisição de dados de uma grande

área em curto espaço de tempo. Principalmente na área da geologia, em que as anomalias magnéticas permitem o realce de fontes magnéticas anômalas associadas à presença e principalmente à ocorrência de ouro, cobre, diamantes e petróleo (Fornazzari Neto & Ferreira, 2003; La Terra et al., 2010; Moreira et al., 2012).

Interação da propriedade magnética com a matéria

As medidas magnéticas dão informações sobre a magnitude e a orientação dos momentos magnéticos, que, em geomateriais, têm origem, essencialmente na camada eletrônica dos átomos de ferro e nas suas mútuas interações, no arcabouço cristalográfico do material (Fabris & Coey 2002).

A existência do momento magnético em átomos, moléculas e sólidos é explicada por análises da estrutura eletrônica do material. Os movimentos dos elétrons que explicam o momento magnético são o movimento do elétron em torno do núcleo, dado pelo momento angular orbital e o movimento do elétron em torno do próprio eixo, dado pelo momento de spin dos elétrons. O spin é uma propriedade quântica apresentando orientação em duas direções, spin up ($\uparrow$) e spin down ($\downarrow$). A susceptibilidade magnética (χ) é a medida da efetividade com que um campo magnético externo (H) induz o dipolo magnético no material (M) que se dá pela equação ($\chi = M/H$). Há uma diferenciação no comportamento das substâncias quando estas são submetidas a um campo magnético. Devido à variação do comportamento (atração ou repulsão) apresentada elas podem ser classificadas em paramagnéticas, diamagnéticas e ferromagnéticas. Os materiais podem ser medidos em relação à susceptibilidade magnética. Quando esta encontra-se entre 10^{-6} e 10^{-3} , são classificados como diamagnéticos e aqueles com (χ) entre 10^{-6} e 10^{-1} são materiais paramagnéticos. Alguns materiais apresentam magnetização mesmo na ausência do campo magnético externo, sendo classificados como ferromagnéticos, ferrimagnéticos ou antiferromagnéticos (Cullity, 1972).

Medidas magnetométricas

Os métodos geofísicos são técnicas indiretas de investigações das estruturas de subsuperfície através da aquisição e interpretação de dados instrumentais, caracterizando-se, portanto, como métodos não invasivos ou não destrutivos.

De acordo com Sampaio et al., (2000) as medidas de magnetização são realizadas basicamente por três métodos: 1) métodos indutivos, 2) através da força ou

do deslocamento quando um material magnetizado é submetido a um gradiente de campo magnético e 3) através da variação de alguma propriedade intrínseca do material tal como magneto-resistência, magneto-ótica, etc.

O campo magnético terrestre pode ser medido através de instrumentos chamados magnetômetros, anteriormente a eles utilizavam-se bússolas e variométricos magnéticos. Os magnetômetros são capazes de detectar as anomalias magnéticas e existem em vários modelos: bobinas de saturação (Fluxgate), bombeamento óptico, magnetômetro de amostra vibrante MAV (vibrating-sample magnetometer), magnetômetro de extração e magnetômetro de haste ressonante (“Reed”) (Codemig, 2010; Sampaio et al.; 2000). O magnetômetro mais conhecido na literatura internacional com a abreviação SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). É um transdutor de fluxo magnético que trabalha a temperaturas criogênicas. Este equipamento como elemento detector é atualmente o sistema mais sensível para medidas de pequenas variações de fluxo magnético na ordem de 10^{-9} emu.

As medições apresentam variações em relação aos tipos de rocha, estas anomalias irão variar em função da forma, do tamanho e do material que compõe o corpo. De modo geral, rochas ígneas e metamórficas geram anomalias positivas e nas rochas sedimentares geram anomalias negativas (Phillips, 1997).

O método é aplicável a profundidade máxima da ordem de 18 a 20 km, uma vez que em maiores profundidades os minerais perdem suas propriedades magnéticas (Telford et al.; 1990).

Os aerolevantamentos serão feitos com uso de equipamentos específicos em função de seu objetivo. Quando será feito de forma regional com o uso de aeronave, caso seja feita a cobertura de uma área maior será utilizado helicóptero. Os aerolevantamentos são feitos com equidistância entre as linhas e esta distância não deve ultrapassar duas vezes a distância entre o sensor e a fonte magnética (Reid, 1980).

Interferências nas determinações magnetométricas

Segundo Blakely (1995), na ausência de campo magnético externo, alguns materiais são capazes de reter magnetização, chamada magnetização remanescente (M_R) que será influenciada pela geologia, cristalografia, raio atômico do elemento e da geologia da região.

Após o levantamento aeromagnético, os dados precisam ser tratados e corrigidos afim de que sejam eliminadas as eventuais distorções, que geralmente apresentam-se como ruídos e são decorrentes de variações como a correção topográfica, variação diurna e remoção do IGRF (International Geomagnetic Reference Field – Campo geomagnético de referência internacional). O tratamento dos dados aumenta a sua confiabilidade. Esses tratamentos foram propostos pelo U.S.G.S (United States Geological Survey).

Entre os tratamentos podem ser citados:

Remoção dos spikes: este tratamento tem como objetivo eliminar dos dados as anomalias causadas por interferências eletro-eletrônicas ou descargas elétricas. Estas anomalias são identificadas pela variação abrupta do valor medido em curto intervalo de tempo. Pode-se analisar cada perfil e retirar os valores duvidosos manualmente ou aplicar um filtro com objetivo de realçar estas diferenças.

Remoção do International Geomagnetic Reference Field (IGRF): é um modelo teórico-matemático do campo magnético da Terra em função das coordenadas geográficas, da altitude, do dia, mês e do ano e são calculadas a cada 5 anos pelo International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA).

Correção de Heading: esta correção consiste em atenuar os efeitos do campo magnético gerado pelos equipamentos da própria aeronave utilizados no levantamento aeromagnético. Baseia-se na realização de um voo-teste anterior ao aerolevanteamento que permitirá corrigir os dados.

Correção de Lag: baseia-se na correção do erro que ocorre devido a distância entre o magnetômetro instalado na cauda da aeronave e o GPS que fica próximo a cabine. Esta localização causa uma variação entre o local exato da medição e o posicionamento marcado.

Correção da variação diurna: a correção da variação diurna faz-se necessária devido a interferência que os ventos solares causam no campo magnético da Terra. Esta correção é realizada mediante a utilização de dois magnetômetros. Desse modo, um ficará em uma estação fixa registrando continuamente o campo magnético a intervalos regulares de poucos minutos, enquanto o outro é utilizado para medir o campo na linha

planejada. A correção é possível a partir da diferença da leitura nestes dois magnetômetros.

Além disso, faz-se necessário a utilização de filtragem dos dados com o propósito mais comum de se realçar, eliminar ou atenuar feições lineares ou planares. Geralmente essa filtragem é feita empregando o software Geosoft.

Distribuição dos minerais magnéticos em rochas e solos

A propriedade magnética dos solos depende fundamentalmente do tipo do mineral e do teor de ferro (Coey, 1988). A magnetização em solos relaciona-se à presença de magnetita (Fe_3O_4) e maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), óxidos de ferro magnéticos mais comuns. Em solos a magnetização é decorrente da Ti-maghemita, Mg-maghemita, magnetita e maghemita (Curi & Franzmeier, 1987; Fabris & Coey, 2002).

A diferenciação do magnetismo em rochas e solos constitui uma propriedade importante para a separação dos mesmos. A susceptibilidade magnética é geralmente mais intensa em rochas ígneas proveniente dos minerais ferrimagnéticos. De modo geral, os minerais com maior susceptibilidade magnética são aqueles com teores de Fe e Ti mais elevados.

De acordo com Ribeiro (2000), em relação às propriedades magnéticas os minerais podem ser classificados em:

diamagnéticos: os minerais diamagnéticos correspondem ao tipo mais fraco de resposta magnética de um sistema, caracterizado por susceptibilidade negativa é da ordem de $\times 10^{-5}$. Como exemplos pode-se citar: calcita, halita, quartzo, etc.

paramagnéticos: estes minerais apresentam momentos magnéticos intrínsecos que não interagem entre si, apresentando por isso magnetização nula. Quando há aplicação de um campo magnético externo haverá alinhamento dos dipolos na direção do campo magnético, nestes materiais a susceptibilidade magnética será positiva da ordem de 10^{-5} e 10^{-3} . Entre os minerais paramagnéticos tem-se: anfibólios, olivinas, piroxênios e silicatos.

ferromagnéticos: a referida magnetização deve-se ao fato destes possuírem momentos de dipolo magnético intrínsecos altamente interagentes que se alinham paralelamente entre si. O módulo da magnetização é várias ordens de grandeza maior do que em materiais diamagnéticos e paramagnéticos. Alguns elementos do grupo de transição, como Fe, Ni e Co, apresentam alta magnetização espontânea, chamado ferromagnetismo verdadeiro. Os antiferromagnetismo, em que os momentos magnéticos

não são igualmente orientados, por exemplo: hematita e ilmenita e os ferrimagnéticos, em que os momentos não são igualmente orientados, mas existe uma resultante em alguma direção como: magnetita, maghemita e titanomagnetita.

Aplicações da magnetometria

A interpretação qualitativa dos dados aeromagnéticos da área de estudo foi realizada com o uso do mapa magnético realçado com o objetivo de se localizar as principais estruturas geológicas.

Os dados magnéticos podem também ser usados para a definição dos greenstone belts, compostos por rochas básicas, portanto mais magnéticas do que o complexo geológico do entorno. Os lineamentos magnéticos comumente encontram-se relacionados às zonas de cisalhamento, falhas, dobramentos e fraturas de uma área (Carvalho, 1999).

A partir dos métodos geofísicos de magnetometria, gravimetria e eletrorresistividade polarizada induzida, foram identificados depósitos de sulfetos do tipo epitermal em Puhupuhi (Nova Zelândia) (Locke et al., 1999).

Em 1980, baseado em um expressivo número de trabalhos geofísicos, principalmente gravimétricos, magnetométricos e cintilométricos Alkmim et al. (1993) propuseram um novo contorno do cráton São Francisco.

Dados magnetométricos também foram utilizados para a identificação de depósitos minerais como os da classe Cu - Au - U- elementos terras raras (ETR) - óxidos de Fe, que são normalmente associados a zonas de alteração hidrotermal que foram detectados a partir das anomalias na região de Pio IX, São Julião e Fronteiras (Piauí) e Campos Sales (Ceará) (Maas et al., 2003).

Carrino et al., (2007) realizaram o mapeamento de diferentes litotipos, buscando indicativos para a prospecção mineral de depósitos de Au-Pd-Pt, Cr- elementos do grupo da platina (EGP), Cu-Mo-Au e Fe, na região Amazônica.

Na região de Cláudio, porção sul do Cráton São Francisco, foram avaliados a adequação dos dados aerogeofísicos para a delimitação de domínios geológicos buscando subsidiar um mapeamento geológico na escala de 1:100.000. Constatou-se a eficiência dos dados magnetométricos para a delimitação de unidades litológicas específicas tais como corpos máficos e ultramáficos (Ruy et al., 2006).

Considerações

O acesso aos dados gamaespectrométricos e magnetométricos, consistem em importantes fontes de informação à Ciência do Solo, uma vez que os teores dos radionuclídeos são importantes ferramentas na predição de importantes atributos físicos e químicos dos solos que futuramente podem ser utilizados representando uma redução no custo de elaboração de tais análises.

Em relação à magnetometria os resultados apresentados pelos trabalhos consultados apontam a técnica como fundamental para a agilidade e eficiência dos mapeamentos geológicos e para o direcionamento da prospecção mineral. Ressaltando-se a importância de utilização dessa técnica com outras informações que permitam a modelagem dos dados geofísicos juntamente aos dados ambientais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se no município de Curvelo, na mesorregião central de Minas Gerais, totalizando 3.344,1 km² e encontram-se inserida nas bacias do Rio São Francisco, Rio das Velhas, Rio Paraopeba, Rio Cipó e Rio Bicudo. O clima da mesorregião enquadra-se como Aw, identificado como clima tropical de savana (Strahler & Strahler, 2002). O clima é considerado quente com temperatura média diária superior a 18 °C em todos os meses do ano e amplitude térmica de 10 °C (Costa et al., 2012). O índice médio pluviométrico é de 1.308 mm/ano.

Elaborou-se um mosaico com imagens do sensor Rapideye, do município de Curvelo-MG, para auxiliar nas análises referentes ao padrão de distribuição das classes de solos na paisagem, juntamente às informações referentes ao uso do solo (Figura 7).

Obtenção de dados altimétricos

O modelo digital de elevação (MDE) foi elaborado a partir de dados extraídos do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), utilizando-se o software ArcGis 9.3 (ESRI, 2006) (Figura 8). A partir do MDE elaborou-se o mapa de declividade (Figura 9), as classes de declividade foram definidas de acordo com Embrapa (2006). Gerou-se ainda o relevo sombreado (Hillshade) que foi utilizado na sobreposição de alguns temas durante a pesquisa e, posteriormente, utilizado sobreposto aos mapas de solos, geológico e ao mosaico de imagens (Figura 7, 10 e 11).

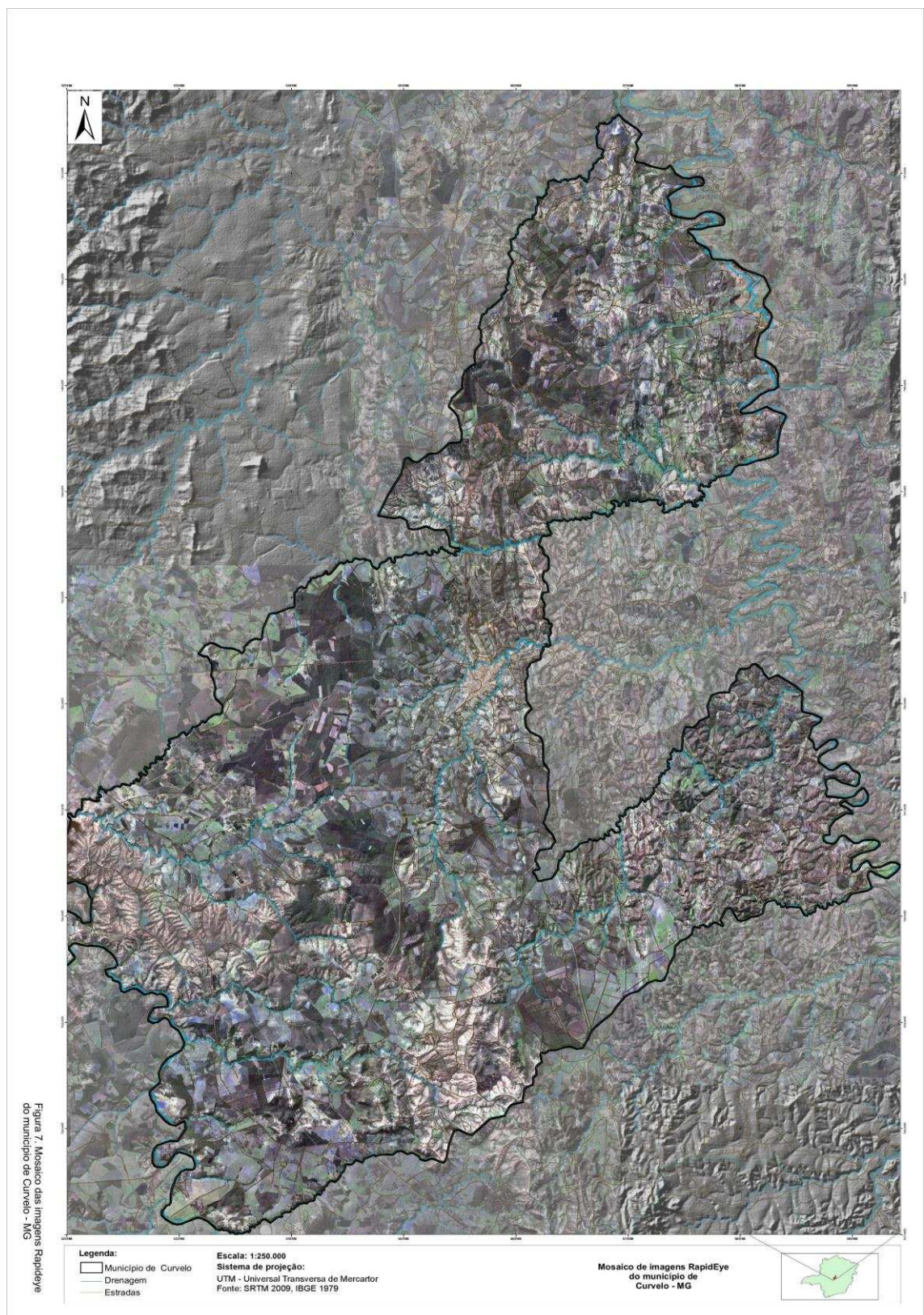


Figura 7. Mosaico das imagens Rapideye para o município de Curvelo-MG.

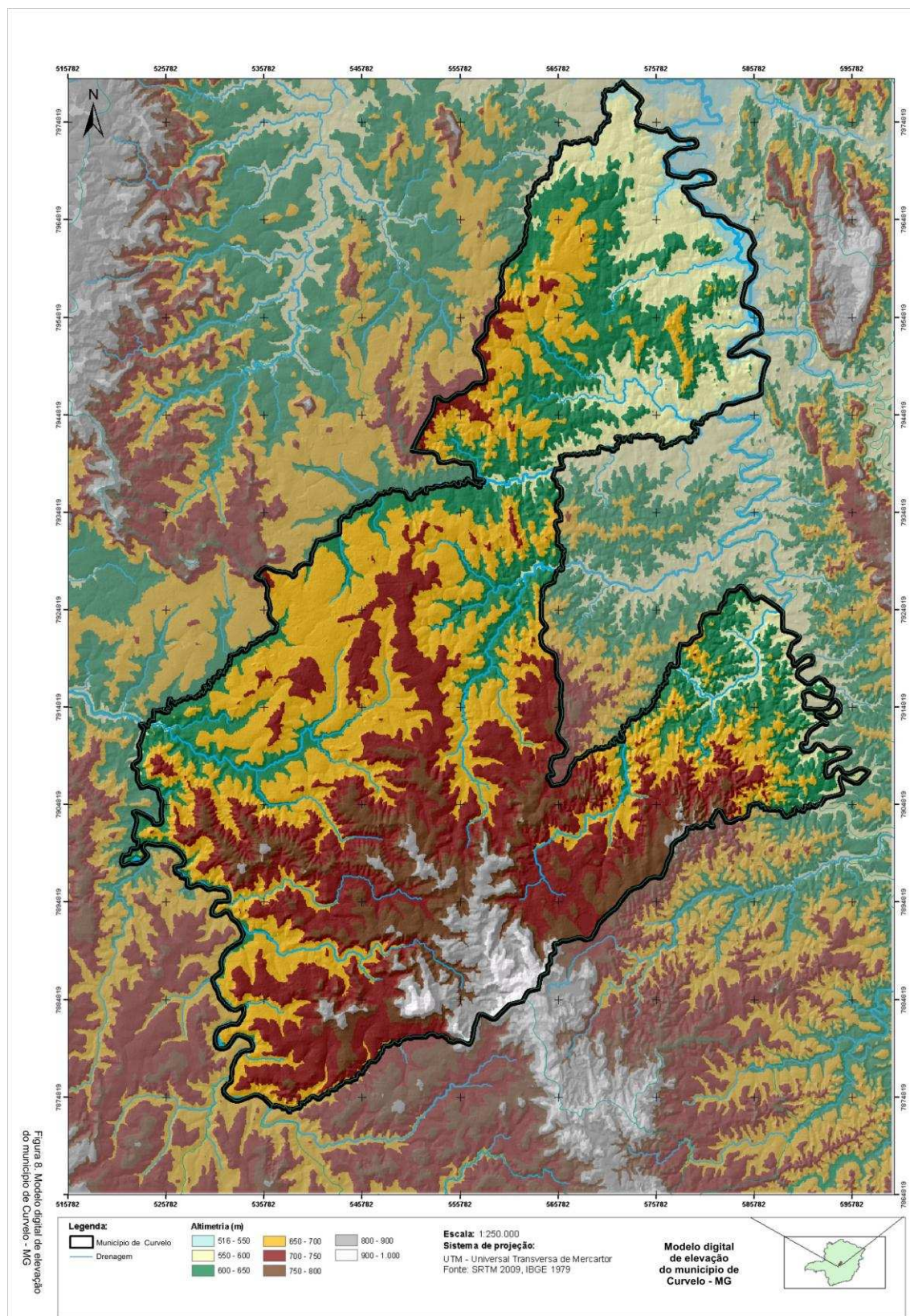


Figura 8. Modelo digital de elevação do município de Curvelo – MG.

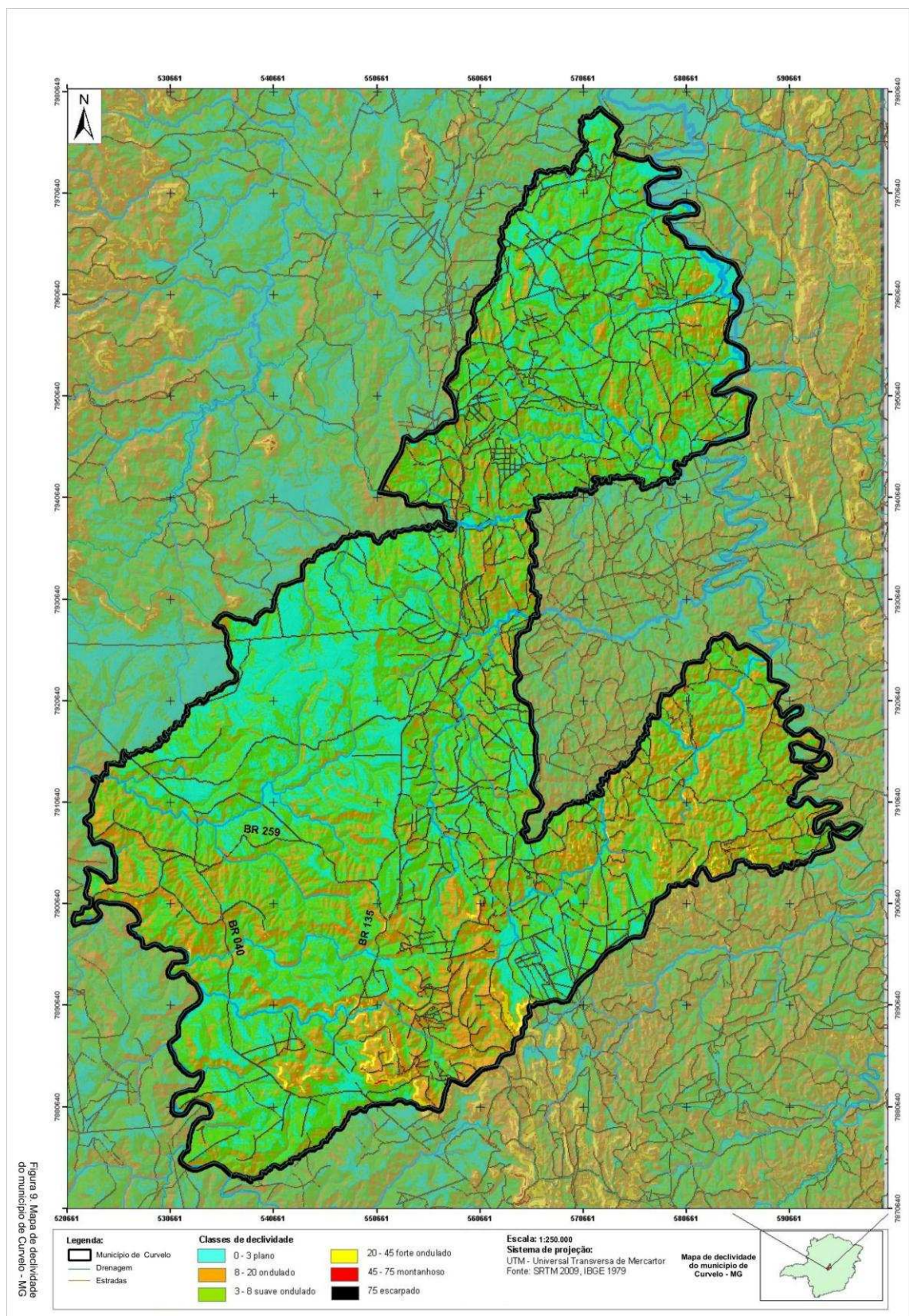


Figura 9. Mapa de declividade do município de Curvelo – MG.

Geologia da área de estudo

Realizou-se a compilação da Geologia das cinco Folhas que compõem o município de Curvelo (Pompéu, Morro da Garça, Corinto, Curvelo e Sete Lagoas) a partir da digitalização manual dos polígonos no software ArcGis 9.3 (Figura 10).

Reconhecimento dos padrões

Para o reconhecimento dos padrões de solos para cada unidade de mapeamento utilizou-se o mapa de solos e o geológico na escala de 1:250.000 (CETEC, 1983), a imagem de satélite Landsat 5, as imagens Rapideye, o mapa de declividade e o modelo digital de elevação (MDE) e as folhas planialtimétricos na escala 1:100.000 (IBGE, 1979).

Os mapas de solos (CETEC, 1983) utilizados foram digitalizados no software ArcGis 9.3, bem como a quantificação das áreas das unidades de mapeamento (Figura 11). As classes de solos foram atualizadas com base no SiBCS (Embrapa, 2006) e, posteriormente, a legenda do mapa de solos foi atualizada. No campo, os padrões das manchas de solos delineadas no mapa foram verificados.

A prospecção na área de estudo foi feita a partir da abertura de trincheiras ou tradagens em pontos da paisagem que auxiliaram no estabelecimento de relações entre os solos e o ambiente local, servindo de base para a investigação dos processos pedogenéticos e definição dos padrões. Os pontos de amostragem foram georreferenciados, usando-se um GPS de navegação marca Garmin - Etrex Vista HCx e fotografados. Os perfis coletados foram descritos conforme Santos & Lemos (2005).

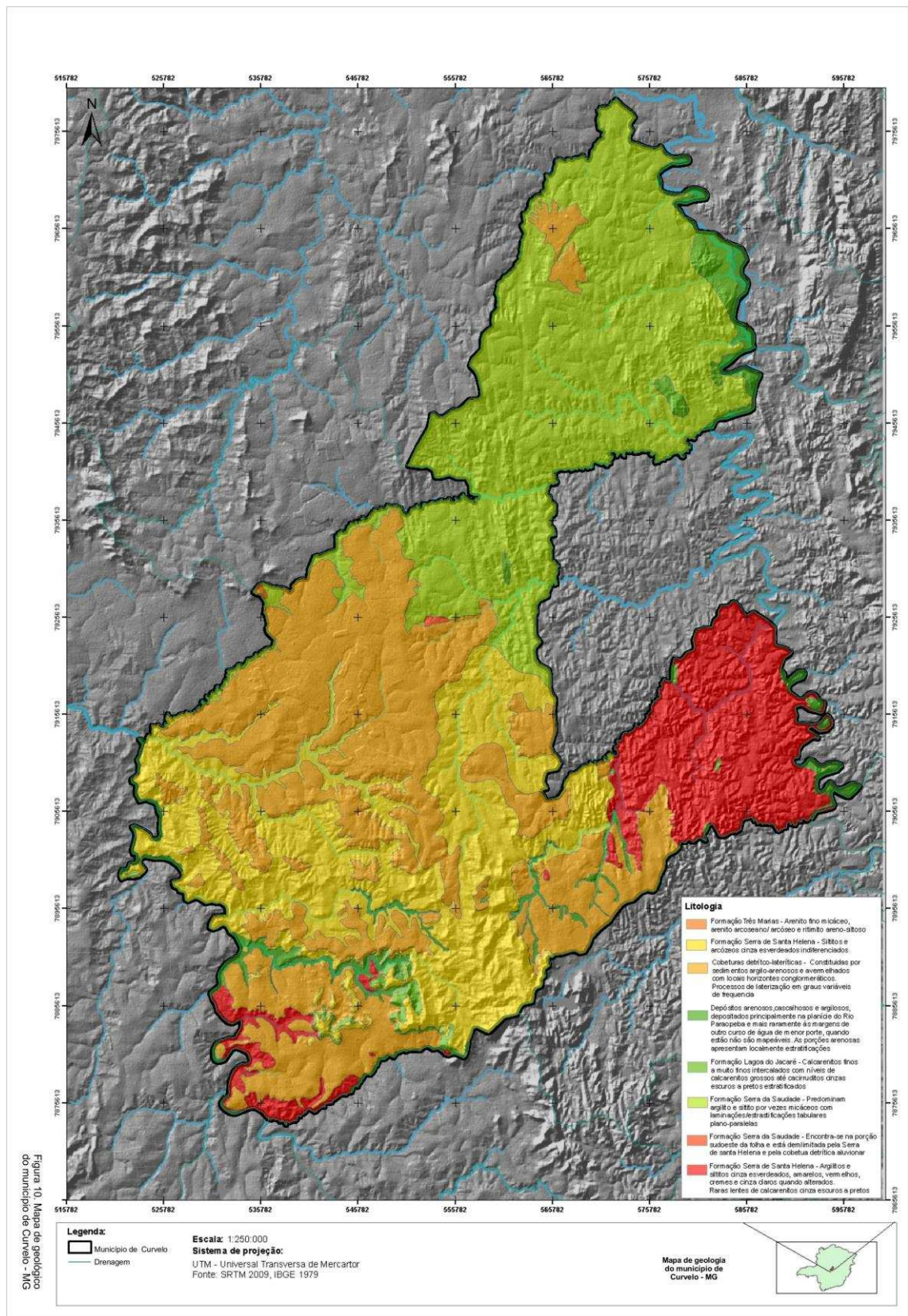


Figura 10. Mapa Geológico do município de Curvelo-MG.

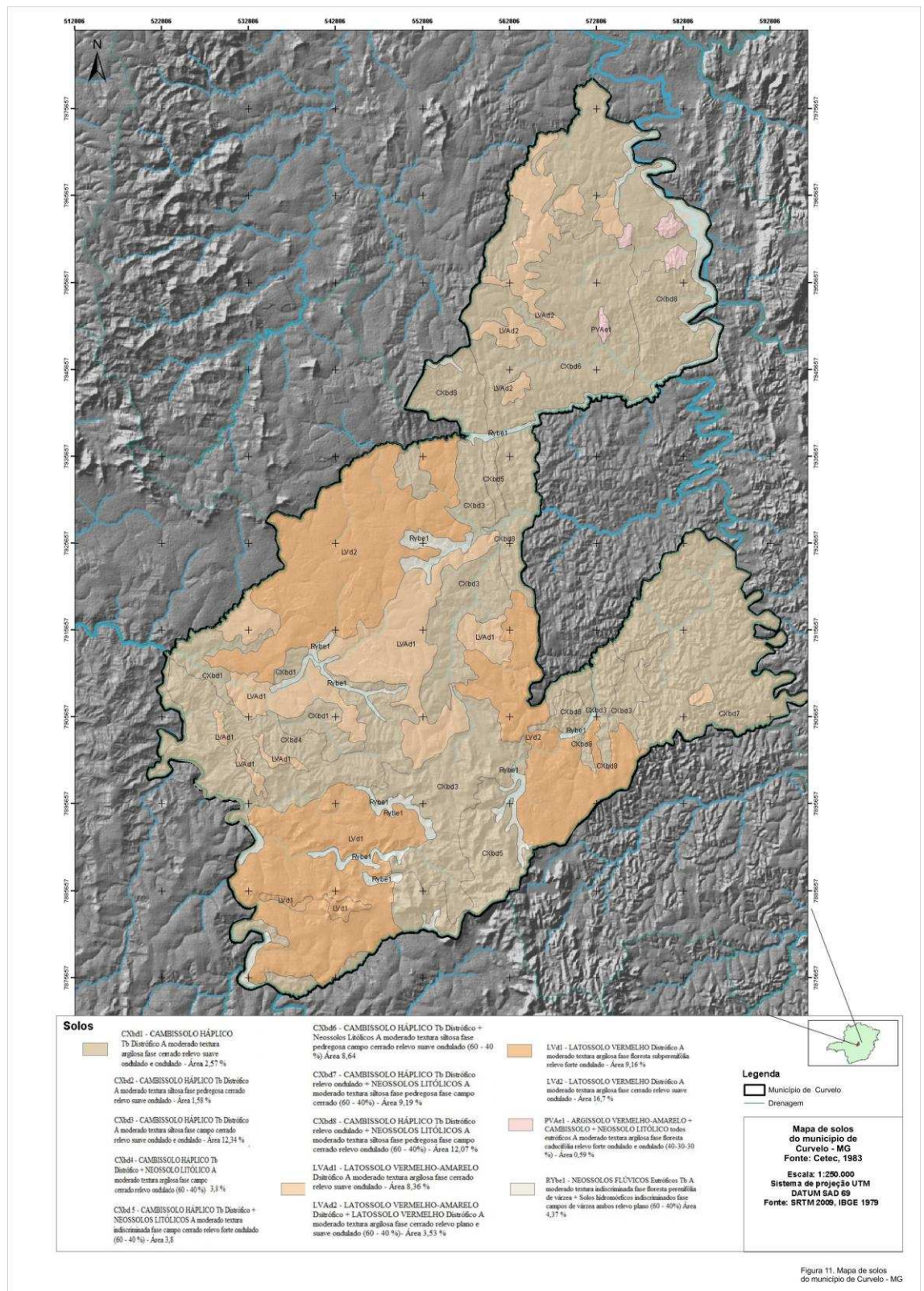


Figura 11. Mapa de solos do município de Curvelo - MG.

Figura 11. Mapa de solos do município de Curvelo – MG.

Obtenção dos dados gamaespectrométricos e magnetométricos

Os dados gamaespectrométricos e magnetométricos resultaram do aerolevantamento executado entre janeiro e abril de 2009, pela Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais - CODEMIG. O aerolevantamento foi realizado por duas aeronaves que utilizaram o modelo do gamaespectrômetro RADIATION SOLUTIONS, modelo RS-500, de 1024 canais espectrais, onde cada um dos cristais detectores foi analisado individualmente para a determinação precisa dos radionuclídeos, e com 256 canais de saída. Para a determinação magnetométrica utilizou-se aparelho GEOMETRICS, modelo G 822 A.

A altura média do voo foi de 100 m. Foram executados 87.212,45 km de perfis aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos de alta resolução, com linhas de voo e de controle espaçadas de 0,5 e 10,0 km, orientadas nas direções NS e EW, respectivamente. Ao longo dos perfis foram realizadas, por segundo, 10 leituras do aeromagnetômetro e uma leitura do gamaespectrômetro. Os dados foram calibrados e processados pelo escritório da Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda., no Rio de Janeiro - RJ. Em relação aos dados gamaespectrométricos, uma leitura feita a cada segundo equivale a aproximadamente 75 m no terreno e os dados magnetométricos equivalem a 7,5 m no terreno (Codemig, 2010).

Interpretação dos dados aerogamaespectrométricos

Os dados obtidos, anteriormente já haviam sido retrocalibrados, sendo as contagens por segundo (cps) da radiação γ transformadas para concentrações dos radionuclídeos (dag kg^{-1} de K e mg kg^{-1} de eU e eTh).

Interpretação dos dados magnetométricos

Para a interpretação dos dados magnetométricos analisou-se a amplitude da intensidade do sinal detectado pelo magnetômetro para a avaliação da ocorrência de anomalias magnéticas.

Coleta das amostras de solos

Realizou-se trabalho de campo, para conferência de limites das unidades de mapeamento (UM) e coleta de amostras de solos e posterior caracterização química e física. Para compor o estudo foram utilizados resultados de análises químicas e físicas de 26 perfis obtidos a partir do presente estudo e 26 perfis obtidos a partir das dissertações Pereira (2008) e (Costa, 2009).

Análises físicas e químicas

O material coletado foi seco ao ar, destorroado e peneirado em peneira de malha de 2 mm para se obter a terra fina seca ao ar (TFSA), que foi submetida às análises físicas e químicas de rotina, segundo Embrapa (1997) e Ruiz (2005). A determinação dos teores de potássio trocável (Mehlich-1); cálcio, magnésio e alumínio trocáveis ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$); carbono orgânico (Walkley-Black). Foi calculada a soma de bases ($\text{SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$); a saturação por bases ($\text{V} = 100 \text{ SB/T}$); as capacidades de troca catiônica total ($\text{T} = \text{SB} + \text{Al} + \text{H}$) e a saturação por alumínio ($\text{m} = 100 \text{ Al/t}$).

Ataque triácido pelo método EPA 3052

As amostras foram trituradas e passadas em peneiras de 200 mesh sendo posteriormente submetidas ao ataque triácido EPA 3052 (USEPA, 1996). Para tal, foram pesadas triplicatas de 0,3 g que foram transferidas para os tubos de teflon com 4 ml de HF, 3 ml de HCl e 9 ml de HNO_3 concentrados. A digestão foi feita no tubo de micro-ondas. A dosagem dos elementos foi feita por ICP.

Difratograma de raios X

As amostras das concreções foram montadas em lâminas escavadas (sem orientação) e irradiadas de 20 a $80^\circ 2\theta$, em difratômetro de raios-X (X' Pert PRO Analytical).

Análises estatísticas

Foram realizadas análises de correlação linear entre as propriedades físicas e químicas dos solos e os dados gamaespectrométricos, procedimento realizado com auxílio do software Statistica, versão 8 (StatSoft, 2007).

Processamento dos dados

De posse da base de dados, executou-se o recorte com o limite do município. Os dados foram analisados, buscando-se avaliar a presença de outliers. Para tal, no software Arc Gis 9.3, fez-se avaliação dos parâmetros estatísticos (média, variância, desvio padrão) de cada canal (K, eU, eTh) e a inspeção visual dos dados. Foram realizadas operações estatísticas para verificar se toda a população apresentava necessariamente concentrações positivas dos elementos analisados.

Modelagem de dados

Buscou-se neste trabalho a realização da análise integrada dos dados. Com isso, o processo de visualização, interpretação e integração foi desenvolvido em um ambiente SIG, permitindo a interação das imagens gamaespectrométricas, imagens dos campos geofísicos medidos, integrações com as demais informações geológicas disponíveis, e pedologia. A análise dessas variáveis foi utilizada para avaliar a aplicabilidade do método geofísico no trabalho de mapeamento de solos.

Nessa análise integrada procedeu-se:

- a) Comparação da imagem correspondente aos canais individuais dos radionuclídeos (K, eU e eTh,) com as unidades de mapeamento de solos e outras variáveis para o entendimento referente à desses elementos.
- b) Análise da imagem magnetométrica junto aos dados de geologia e pedologia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Comparação da imagem correspondente aos canais (K, eU, e eTh) com as unidades de mapeamento de solos e outras variáveis para o entendimento referente a distribuição dos radionuclídeos.

Após a reclassificação das imagens individuais dos canais dos elementos K, eU e eTh (Figuras 12, 13 e 14) e análise individual de cada elemento, o processamento dos histogramas para cada um dos elementos permitiu a eliminação das outliers. Os melhores resultados para os elementos eU e eTh foram alcançados ao se considerar que toda a população encontrava-se no intervalo entre $x+3s$ e $x-3s$, para o elemento K a população ficou compreendida entre $x+5s$ e $x-5s$, sendo x correspondente a média e s ao desvio padrão.

A interpretação dos dados consistiu na análise visual das imagens radiométricas previamente corrigidas, análises estatísticas e correlação com vários dados disponíveis como: mapa de solos, litologia e dados de análises químicas, físicas e mineralógicas.

A análise conjunta dos dados faz-se imprescindível uma vez que durante o intemperismo químico e físico, os radionuclídeos são liberados da rocha, podendo ser redistribuídos e incorporados ao solo. Em muitos casos, as características desses elementos podem ser distintas do material de origem em razão da possível reorganização textural e geoquímica que ocorre no perfil de solo em decorrência do intemperismo (Willford et al.,1997).

Dessa forma, a análise das imagens individuais dos canais dos elementos K, eU e eTh (Figuras 12, 13 e 14) juntamente aos dados de atributos do terreno, geológicos e pedológicos (Figuras 8, 9, 10 e 11) possibilitaram o entendimento do padrão de distribuição espacial, o comportamento e a mobilidade desses radionuclídeos nas distintas unidades de mapeamento de solos.

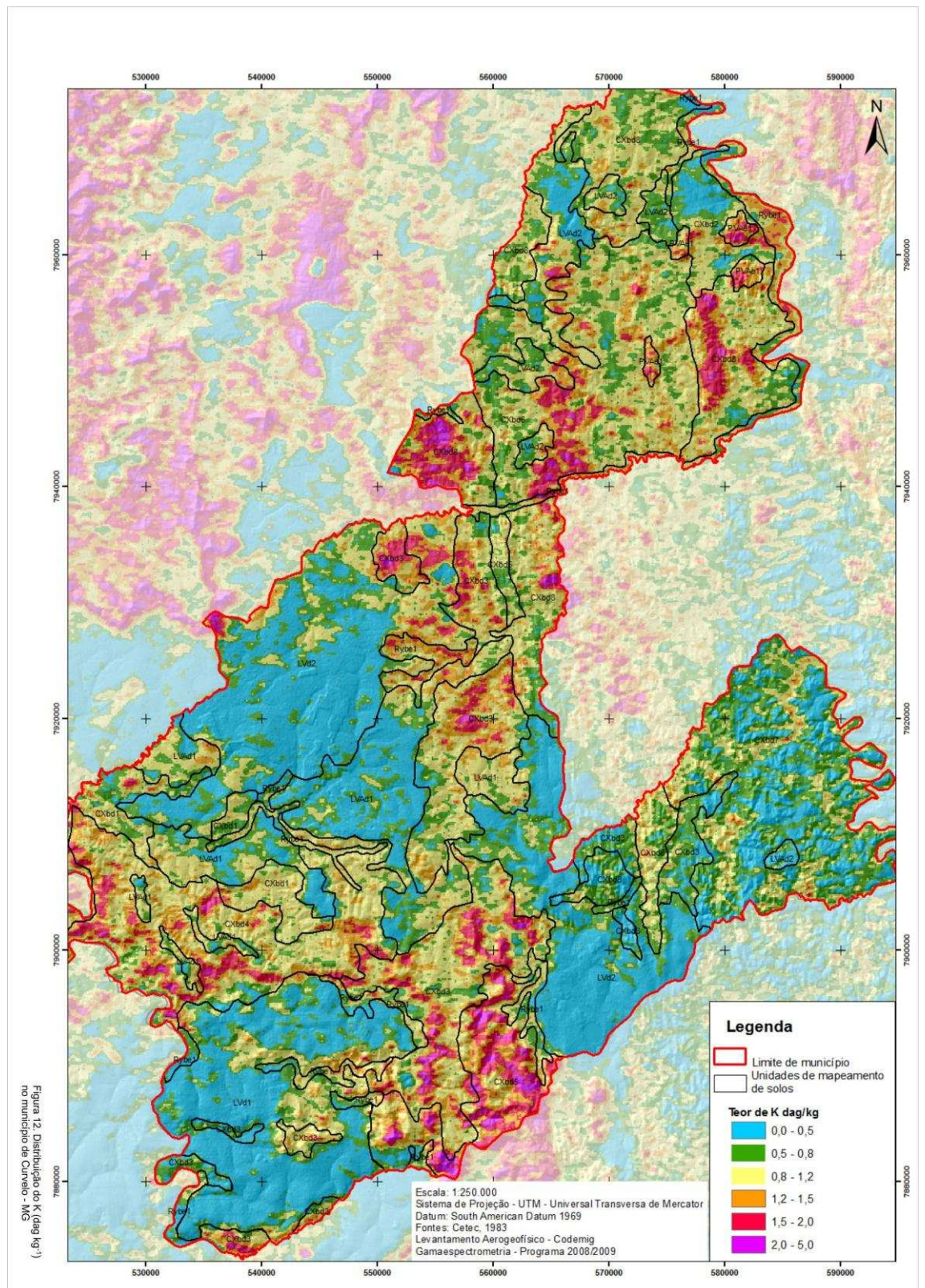


Figura 12. Distribuição do K (dag kg⁻¹) no município de Curvelo.

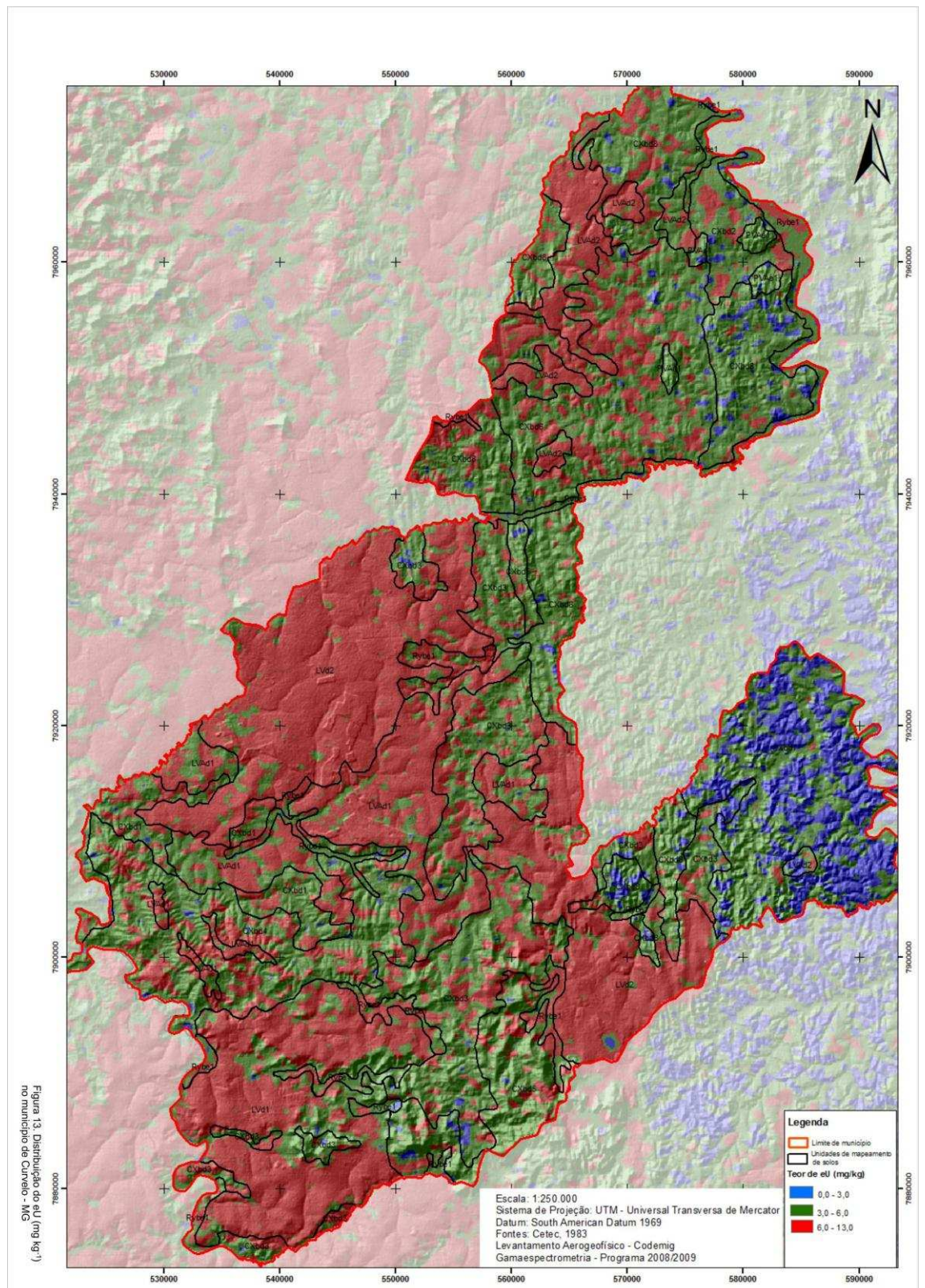


Figura 13. Distribuição do eU (mg kg^{-1}) no município de Curvelo.

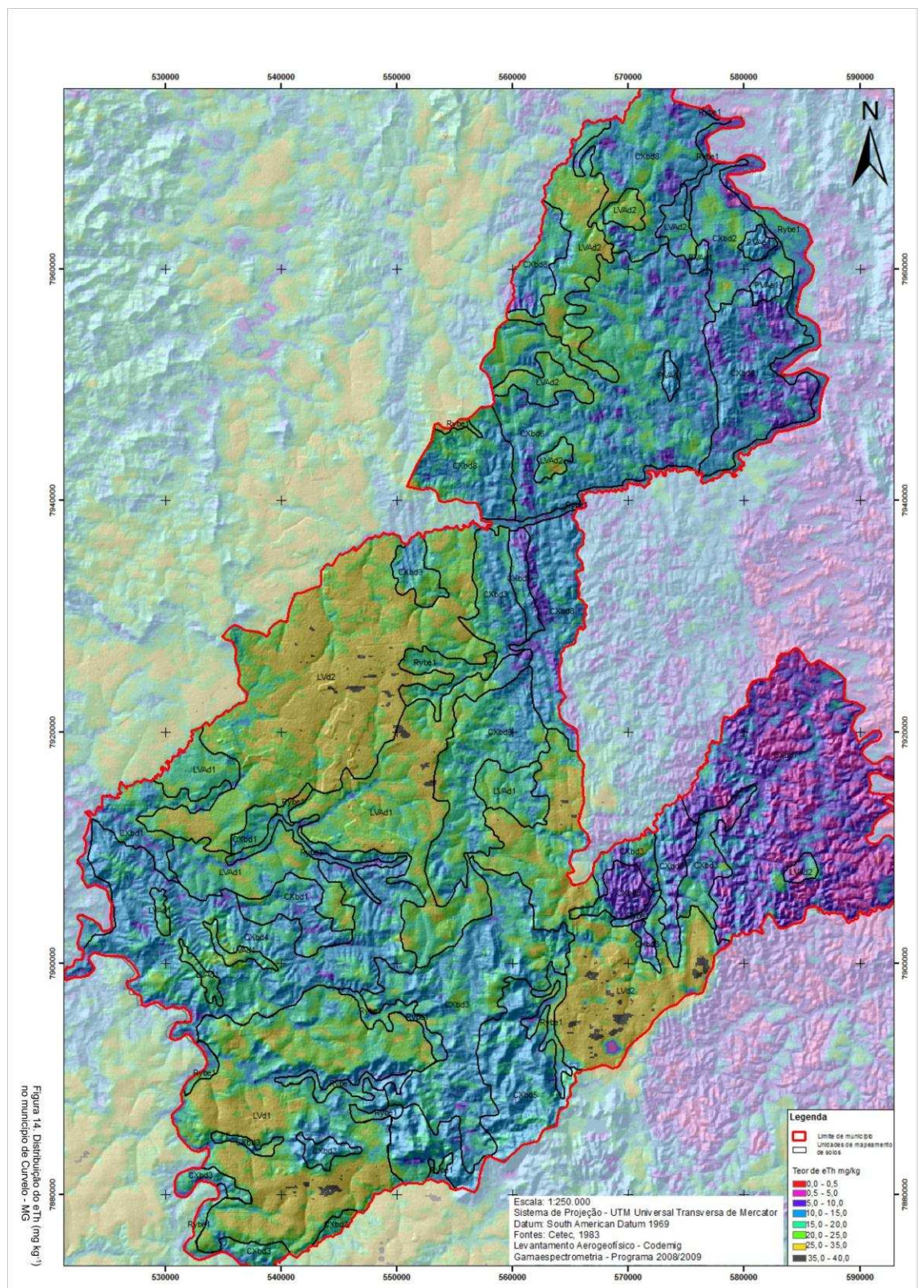


Figura 14. Distribuição do eTh (mg kg⁻¹) no município de Curvelo.

Os resultados apresentados evidenciaram, principalmente, a diferença do comportamento gamaespectrométrico para cada uma das unidades de mapeamento de solos. As imagens dos canais individuais possibilitaram uma análise referente à existência de similaridade em relação ao padrão de distribuição espacial dos radionuclídeos eU e eTh, os quais apresentam comportamento distinto do elemento K. Esses resultados foram corroborados pelos gráficos (Figuras 15, 16 e 17) que representam a distribuição dos teores dos radionuclídeos em cada unidade de mapeamento.

A partir de uma avaliação geral da área de estudo constatou-se que as concentrações de K variaram entre 0,1 a 5,0 dag kg⁻¹, com média de 0,74 dag kg⁻¹. A concentração de eU variou de 0,1 a 13,0 mg kg⁻¹ com média 4,6 mg kg⁻¹. Para o eTh a concentração, encontra-se entre 0,1 e 40,0 mg kg⁻¹, com média 11,28 mg kg⁻¹. A amplitude relativa da variação das concentrações de eU e eTh são maiores que a do K. Os valores de eU e eTh apresentaram concentrações acima da concentração média existente na crosta terrestre, entre 2,7 mg kg⁻¹ para eU e 10,5 mg kg⁻¹ para eTh (Minty, 1997).

Os teores de eTh apresentaram-se mais elevados comparativamente aos de eU. Tais teores de concentração crustal de eTh são coerentes para áreas com topografia mais suave devido à menor mobilidade apresentada por esse elemento e pela sua fixação durante o avanço do intemperismo químico que junto ao processo de latossolização condiciona a retenção desses elementos em minerais residuais. Segundo Wilford et al. (1997) os radionuclídeos tendem a ser adsorvidos em minerais de argila e co-precipitados em óxidos de ferro.

As assinaturas gamaespectrométricas médias dos radionuclídeos obtidas a partir da zonal statistics permitiram a análise da distribuição dos teores desses elementos entre as unidades de mapeamento de solos (Figuras 15, 16 e 17).

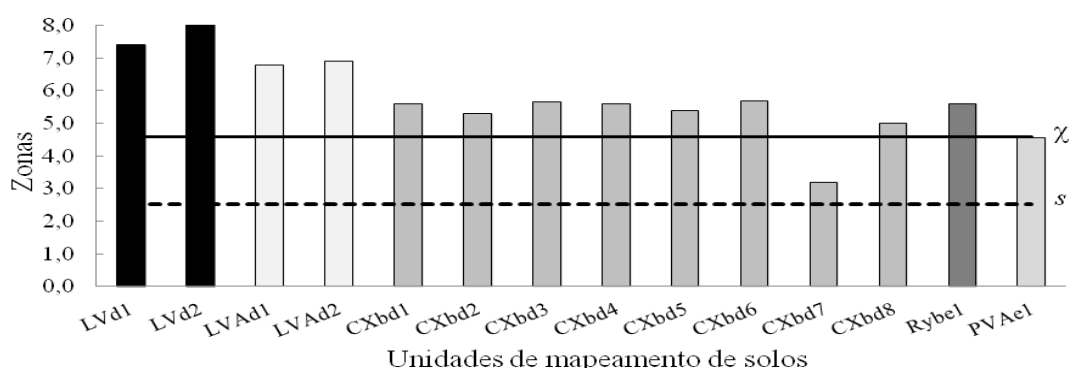


Figura 15 – Distribuição dos teores de eU (mg kg⁻¹) nas unidades de mapeamento de solos da área de estudo.

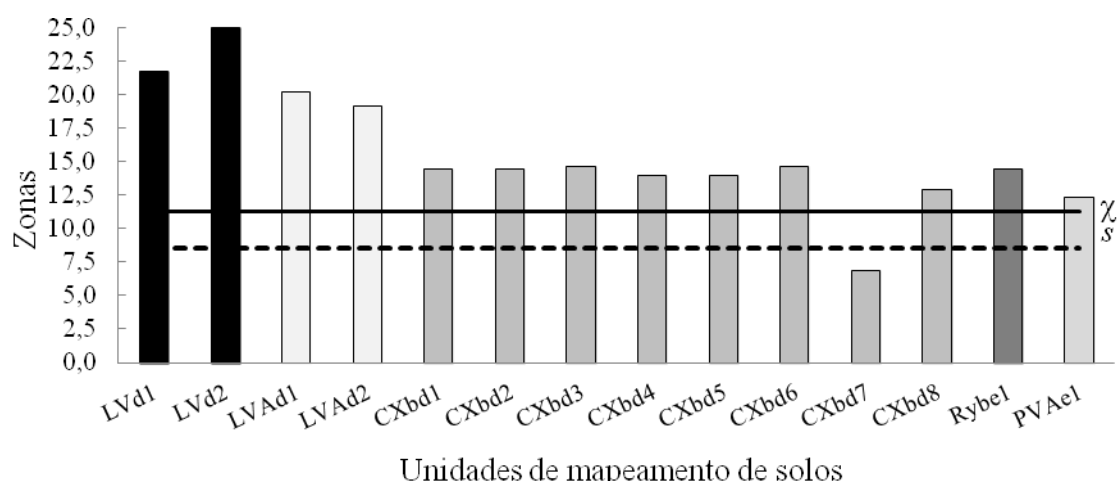


Figura 16 – Distribuição dos teores eTh (mg kg⁻¹) nas unidades de mapeamento de solos da área de estudo.

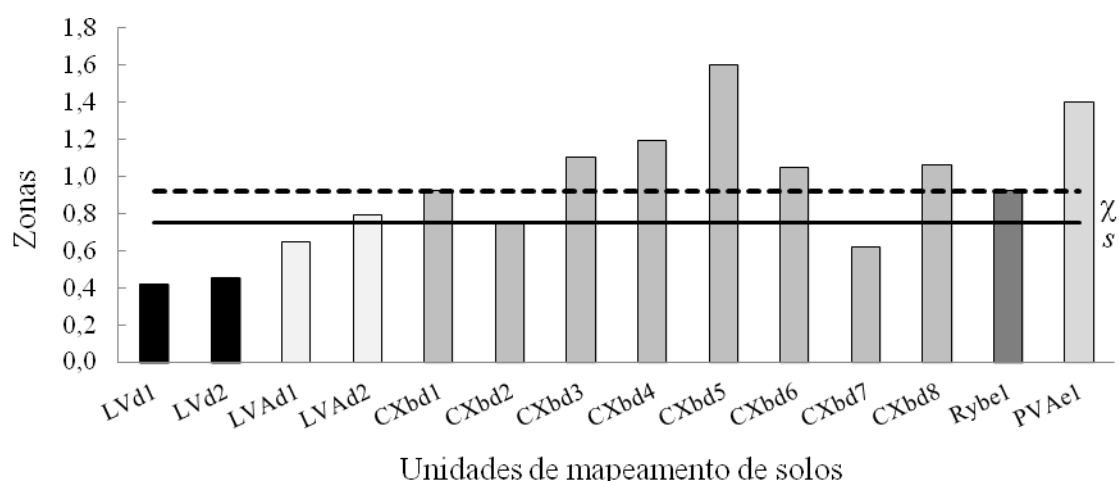


Figura 17 – Distribuição dos teores de K (dag kg⁻¹) nas unidades de mapeamento de solos da área de estudo.

A sobreposição do mapa de solos sobre a imagem do canal de K, bem como os gráficos (Figuras 15, 16 e 17) e o mapa da distribuição de K (Figura 12), permitiram constatar que os teores mais baixos do elemento estão associados às unidades de mapeamento de solos referentes aos Latossolos Vermelhos, solos mais desenvolvidos. A depleção desse elemento é coerente ao esperado para esta classe, devido à maior intensidade da pedogênese que se deve a atuação do intemperismo e lixiviação, em que há desestabilização na estrutura dos minerais primários e liberação do K para a solução do solo. Posteriormente, a grande mobilidade conferida ao K faz com que esse seja facilmente perdido para a solução do solo. Além disso, o K é geoquimicamente móvel e solúvel na maioria das condições de intemperismo, o que indica que ele pode estar sendo lixiviado para maiores profundidades por fluxo superficial.

Na classe dos Latossolos, os baixos teores de K são acompanhados, por teores mais elevados de eU e eTh (Figuras 12, 13 e 14). Esse resultado foi corroborado pela análise qualitativa das imagens gamaespectrométricas e altimétrica (Figuras 8, 12, 13 e 14), em que se confirmou a forte correlação do relevo dos topos mais elevados aplainados (platôs) com elevadas concentrações de eTh e eU e baixos valores de K. Tais áreas estão associadas às unidades litoestratigráficas mapeadas por Costa et al., (2012) no contexto geológico Ndl – coberturas detrítico-lateríticas. Neste contexto geológico formam-se os Latossolos, solos que em seu processo de formação são intensamente lixiviados e intemperizados, processos que os tornam condizentes com o acúmulo relativo de eU e eTh e perda de K por lixiviação.

Estudos de solos na Austrália demonstraram variações significativas nos teores de K em rocha e solos. Isto reflete a perda desse elemento por lixiviação após a atuação da pedogênese, concomitantemente ao enriquecimento de eU e eTh, especialmente na fração argila, devido à retenção destes elementos nos óxidos de ferro, argilominerais e minerais resistentes nos solos originados e basalto e diorito o dobro. Neste estudo os autores constataram a presença do dobro de eU e eTh nos solos em relação à proporção encontrada nas rochas (Dickson & Scott, 1997).

Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA) e parte dos Cambissolos apresentaram teores intermediários de K. Em relação aos PVA, o intervalo entre 1,2 e 2,0 dag kg⁻¹ de K foi adequado na delimitação de suas manchas (Figura 12), considerando que eles ocorrem em áreas de geologia, onde ocorre o afloramento da Formação Lagoa do Jacaré. Esses solos por serem ainda jovens pedologicamente, apresentam tendência ao aumento dos teores de radionuclídeos. Resultados semelhantes a estes foram relatados por Herrmann et al. (2010) em estudos de Alisols na Tailândia.

Os Cambissolos apresentam em sua constituição mineralógica além da muscovita, feldspato potássico e ilita que apresentam em sua estrutura o elemento K. Além disso, a ocorrência dessa classe de solos em áreas mais movimentadas (Figuras 7 e 8), em razão do maior dissecamento favorece o aparecimento do horizonte C e proporciona o sinal de maior intensidade do K. Neste horizonte encontra-se maior abundância de minerais primários, fontes desse elemento (Pereira et al., 2010). Wilford et al. (1997) constataram que em áreas de erosão ativa, as respostas gamaespectrométricas refletem à geoquímica e a mineralogia do material de origem.

As unidades de mapeamento CXbd5 e CXbd4 apresentaram os teores mais elevados de K. Essas unidades referem-se à ocorrência de Cambissolos em áreas mais movimentadas da paisagem, confirmadas pelo mosaico, MDE e mapa de declividade

(Figuras 7, 8 e 9). A maior intensidade do sinal do K nas manchas de Cambissolos pode estar associada à disposição horizontalizada das rochas pelíticas que associada à mineralogia micácea siltosa dificultam a infiltração da água e, conseqüentemente, o avanço do intemperismo. Becegato & Ferreira (2005) encontraram os maiores teores de K nos solos de textura mais grosseira, indicando a presença de minerais primários que são fontes naturais desse elemento. Godoy et al. (2011) também constataram teores de K mais elevados nas partes mais altas da paisagem, em que os minerais fontes de K são expostos em função dos processos erosivos serem mais ativos.

Além disso, a maior média de K foi constatada na unidade de mapeamento CXbd5, uma vez que teores mais elevados do elemento podem ser atribuídos ao fato dessa unidade de mapeamento consistir da associação entre Cambissolos e Neossolos Litólicos. Estes apresentam ainda menor desenvolvimento, por serem geralmente originados de siltitos, material de origem condizente com elevados teores de K. A unidade de mapeamento CXbd4, apesar de ser igualmente uma associação entre Cambissolos e Neossolos Litólicos, trata-se de uma unidade de mapeamento que apresenta textura argilosa, o que confere de modo geral teores mais baixos de K.

Na figura 17, o gráfico demonstra médias aproximadas de K nas unidades de mapeamento CXbd3, CXbd6 e CXbd8 condizentes com a textura siltosa apresentadas pelos solos destas unidades.

As unidades de mapeamento CXbd2 e CXbd7 apresentaram os menores teores de K dentro da classe dos Cambissolos. Este comportamento pode ser explicado por ambos apresentarem fase pedregosa. Sendo assim, a abundância de quartzo nos primeiros 30 cm do solo provavelmente confere baixa detecção de radionuclídeos, uma vez que a interação dos raios γ com as frações grosseiras calhaus e matacões na superfície do solo, diminuem a interação do detector com os minerais primários fontes do elemento K.

Em relação aos ambientes flúvicos, o teor de K é geralmente entre 1,20 e 2,00 dag kg⁻¹, o que pode ser observado na unidade de mapeamento de solos (RYbe1). A sobreposição da drenagem no mosaico do município de Curvelo-MG permitiu constatar que esse teor é geralmente superior ao das áreas vizinhas. Souza & Ferreira (2008) também constataram teores de K mais elevados nas áreas de ocorrência dos aluviões do Quaternário, atribuindo além da contribuição dos fertilizantes potássicos à contribuição natural de feldspatos potássicos, muscovitas e ilitas.

Os gráficos (Figuras 15, 16 e 17) referentes às unidades de mapeamento dos Neossolos Flúvicos demonstram teores intermediários dos três radionuclídeos avaliados

(K, eU e eTh). O ambiente de formação desses solos condiciona à deposição de materiais abundantes em minerais primários. Wilford et al. (1997) encontraram elevados teores de K, eTh e eU em ambientes fluviais, sedimentos originados de rochas graníticas e metamórficas e concluíram que esses teores mais elevados são condicionados pela atuação dos processos erosivos, o transporte e a deposição dos sedimentos foram relativamente rápidos, tempo que não é favorável a atuação do intemperismo, o que mantém a composição dos radionuclídeos no sedimento depositado.

Os teores de eU e eTh elevados em Latossolos e baixo em Cambissolos sugerem que os radionuclídeos na área do Grupo Bambuí não são litológicos, uma vez que os teores seriam naturalmente mais elevados nos Cambissolos devido ao seu menor grau de desenvolvimento. Esses resultados são condizentes com os baixos teores de eU e eTh em rochas sedimentares, especialmente argilitos e siltitos, conforme relatado por Dickson & Scott, 1997.

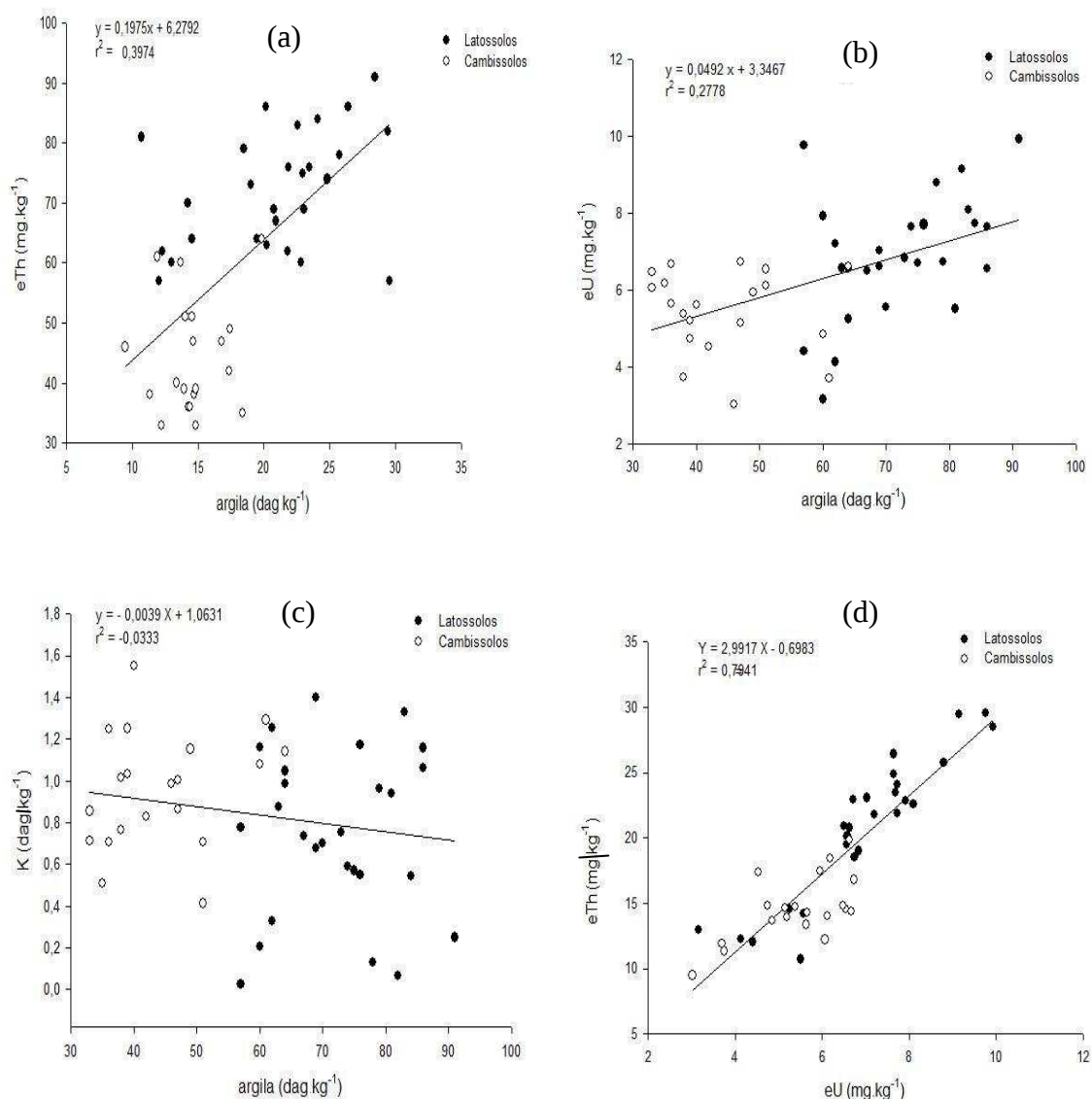


Figura 18. Relação entre os teor de argila com teor de K (a), teor de eU (b), teor de eTh (c) e entre eTh e eU (d) ambos obtidos por aerogamaespectrometria em Cambissolos e Latossolos no município de Curvelo - MG.

O eTh apresentou-se adequado na separação das classes de solos. A intensidade do sinal é alta, em todos os Latossolos Vermelho Distróficos, acompanhados da litologia de cobertura detrito-laterítica Ndl. Nos Latossolos Vermelho-Amarelos a intensidade é intermediária. O eTh provavelmente foi depositado nessa geologia de cobertura em função do retrabalhamento do relevo. Neste material é comum a presença do elemento eTh em proporção considerável, principalmente como constituinte do zircão, uma vez que apresenta considerável resistência ao intemperismo.

Unidades de mapeamento originados nas várzeas por depósitos aluviais apresentaram sinal de eTh muito baixo. Isto pode ser explicado pela baixa mobilidade deste elemento e também por não ser constituinte da litologia que contribui com a formação da unidade N4a – sedimentos aluviais, compostas basicamente por sedimentos inconsolidados de natureza arenosa, argilosa, argila siltosa, contendo localmente seixos e matacões.

A unidade de mapeamento CXbd7 apresentou a menor média de eTh, este resultado provavelmente relaciona-se ao fato já mencionado anteriormente, que trata da baixa detecção dos radionuclídeos em decorrência da fase pedregosa, igualmente observado na detecção dos demais elementos.

As demais unidades de mapeamento constituídas por Cambissolos, apresentaram comportamento similar, com teores de eTh inferiores às médias apresentadas pelas unidades de mapeamento referentes à classe dos Latossolos. Este comportamento, pode ser atribuído ao material de origem de formação dos Cambissolos, siltitos e argilitos, que são condizentes com o baixo sinal do eTh, uma vez que este elemento não consiste em componente dos minerais formadores dessas litologias.

Correlação dos dados gamapesctrométricos e magnetométricos com os atributos físicos e químicos dos solos

A partir da análise visual das distribuições de eU e eTh (Figuras 13 e 14), dos gráficos de dispersão (Figura 18) foi possível constatar a existência de relacionamento entre os dados de eU e eTh com a fração argila dos solos, uma vez que os teores mais elevados desses elementos ocorrem nas manchas de Latossolos. Esses resultados observados são coerentes aos encontrados por Perez et al. (1998), que, após analisarem amostras de solos de lugares distintos do Brasil, constataram correlação positiva entre teores de eU e eTh e porcentagem de argila no horizonte A ($r^2 = 0,87$ e $r^2 = 0,77$), respectivamente.

Além disso, identificou-se uma correlação significativa entre eU e eTh com teor de argila, tanto no horizonte A ($r^2 = 0,58$ e $r^2 = 0,51$) e horizonte B ($r^2 = 0,56$ e $r^2 = 0,64$, $p < 0,05$) (Quadro 5 e 6). Esse resultado permite afirmar que os teores de eU e eTh são adequados para a predição da textura dos solos, corroborando a análise qualitativa. Tais resultados corroboram os resultados os resultados verificados por Taylor et al., (2002) em estudos de solos da Austrália no qual encontraram correlação positiva e

significativa entre a porcentagem de argila e a contagem total na profundidade de 0-10 cm do solo ($r^2 = 0,71$, $p < 0,001$).

O relacionamento pode ser explicado pela similaridade de tamanho entre os raios iônicos do U (0,95 Å), do Th (0,98 Å), comparáveis aos do Ca^{2+} (0,99 Å) e do Na^{1+} (0,97 Å). Becegato & Ferreira (2005) constataram que principalmente o U^{6+} apresenta condições de competitividade por sítios de trocas com o Ca^{2+} e o Na^{1+} na superfície dos argilominerais. Além disso, a proporção de caulinita e óxidos de ferro nos solos de textura mais fina comparativamente aos Cambissolos podem explicar os teores mais elevados em solos argilosos uma vez que ambos apresentam importantes sítios de adsorção para os radionuclídeos eU e eTh.

A correlação negativa entre os teores de eU e eTh e as frações silte e areia, verificada neste trabalho (Quadro 5) representa a baixa concentração desses radionuclídeos nas rochas pelíticas, material de origem dos referidos solos. Ainda não se sabe a respeito da possibilidade do eU e eTh ocorrerem de forma estrutural nos óxidos de ferro. Entretanto, esses elementos podem ser transportados em solução e adsorvidos em argilominerais, óxidos de ferro e coloides orgânicos (Dickson & Scott, 1997).

A correlação positiva do K trocável com a CTC_r foi observada tanto no horizontes A (0,61) quanto no horizonte B (0,62). Esse resultado é coerente com a mineralogia (muscovitas e illita) das rochas pelíticas que originaram os solos em questão, cujos minerais primários constituem fontes abundantes de K. Esse relacionamento denota a influência do K como principal cátion participante do complexo de troca, reflexo também da mineralogia.

Em relação à correlação entre o teor de K total e o teor de silte (0,31) no horizonte B, esta se apresentou baixa. Tal resultado indica a possibilidade de ocorrência do K tanto na muscovita que se refere à fração silte, quanto na illita muito comum na fração argila de solos do Grupo Bambuí. O resultado observado corrobora a ideia de que dados gamaespectrométricos não devem ser usados associados apenas com dados laboratoriais e sim juntamente com variáveis que permitam a elaboração de uma análise ambiental para que eles tornem fonte segura de informação para colaborar na possível predição das classes de solos.

Quadro 6: Coeficientes de correlação linear entre teores de radionuclídeos e alguns atributos físicos e químicos do Horizonte A de 47 perfis de solos

	K ^{1/}	eTh ^{1/}	eU ^{1/}	Mag ^{2/}	Ct ^{1/}	Th/K	Th/U	U/K	K ^{+3/}	CO ^{4/}	Silte	Argila	CTCr ^{5/}	Kt ^{6/}	AG ^{7/}	AF ^{8/}	S/A ^{9/}	ADA ^{10/}	GF ^{11/}	pH/H ₂ O ^{12/}	pH/KCl ^{12/}	Al ^{3+13/}	Ca ^{2+13/}	Mg ^{2+13/}	H + Al ^{14/}	S ^{15/}	V ^{14/}	m ^{14/}	P ^{3/}
K	1	-0,5	-0,52	0,04	-0,25	-0,7	0,06	-0,72	-0,07	-0,04	0,23	-0,07	0,17	0,09	-0,32	-0,01	-0,04	-0,08	0,03	0,25	0,25	-0,44	0,33	0,09	-0,37	0,1	0,38	-0,35	0,12
eTh		1	0,87	0,13	0,93	0,66	-0,5	0,64	0,01	-0,01	-0,59	0,58	-0,47	-0,18	-0,21	-0,47	-0,14	0,2	-0,01	-0,21	-0,11	0,29	-0,32	-0,12	0,36	-0,15	-0,35	0,32	-0,15
eU			1	0,13	0,9	0,61	-0,07	0,61	-0,15	-0,18	-0,54	0,51	-0,49	-0,1	-0,04	-0,32	-0,25	0,08	0,06	-0,29	-0,08	0,34	-0,46	-0,33	0,35	-0,35	-0,49	0,52	-0,22
Mag				1	0,18	-0,09	-0,09	-0,09	-0,02	0,01	-0,09	0,14	0,04	-0,13	-0,1	-0,21	-0,03	0,22	-0,18	0,13	0,12	-0,11	0,06	0,01	0,11	0,01	0,05	-0,09	0,2
Ct					1	0,51	-0,35	0,49	-0,13	-0,15	-0,56	0,62	-0,49	-0,13	-0,27	-0,5	-0,26	0,12	0,05	-0,21	-0,01	0,19	-0,35	-0,25	0,3	-0,28	-0,36	0,37	-0,19
Th/K						1	-0,21	1	-0,04	-0,03	-0,25	0,22	-0,07	-0,14	0,07	-0,18	-0,1	0,11	-0,08	-0,16	-0,01	0,43	-0,15	-0,11	0,43	-0,11	-0,2	0,29	0,17
Th/U							1	-0,16	-0,33	-0,35	0,41	-0,38	0,21	0,13	0,45	0,42	-0,18	-0,28	0,1	-0,04	0,11	0,07	-0,14	-0,39	-0,09	-0,36	-0,13	0,25	0,01
U/K								1	-0,05	-0,04	-0,22	0,19	-0,05	-0,12	0,09	-0,16	-0,1	0,1	-0,09	-0,17	-0,02	0,46	-0,16	-0,13	0,44	-0,13	-0,2	0,31	0,17
K ⁺									1	0,99	-0,01	-0,33	-0,21	-0,3	0,02	0,06	0,97	0,54	-0,56	-0,22	-0,74	0,17	0,04	0,89	-0,19	0,88	0,02	-0,36	0,09
CO										1	0	-0,32	-0,14	-0,33	-0,02	0,03	0,96	0,55	-0,57	-0,16	-0,67	0,13	0,13	0,92	-0,17	0,91	0,11	-0,43	0,17
Silte											1	-0,89	0,62	0,21	0,25	0,57	0,22	-0,14	-0,23	0,17	0,04	-0,04	0,28	0,09	-0,34	0,12	0,3	-0,19	0,2
Argila												1	-0,46	-0,14	-0,46	-0,71	-0,55	-0,07	0,38	-0,02	0,29	-0,08	-0,17	-0,33	0,35	-0,36	-0,16	0,19	-0,15
CTCr													1	-0,02	0,28	0,12	-0,09	-0,06	-0,12	0,62	0,57	-0,16	0,78	0,16	-0,08	0,19	0,78	-0,49	0,63
Kt														1	0,06	0,36	-0,25	-0,35	0,29	0,13	0,11	-0,3	-0,05	-0,31	-0,28	-0,29	-0,07	0,16	-0,42
AG															1	0,3	0,1	0,21	-0,16	0,09	-0,07	0,2	-0,02	-0,03	0,01	0	-0,02	0,06	0,14
AF																1	0,24	-0,17	-0,06	-0,17	-0,25	0,02	-0,16	-0,04	-0,29	-0,02	-0,19	0,17	-0,19
S/A																	1	0,47	-0,58	-0,21	-0,74	0,17	0,05	0,86	-0,26	0,86	0,03	-0,34	0,1
ADA																		1	-0,82	-0,03	-0,26	0,29	0,09	0,52	0,1	0,51	0,11	-0,23	0,36
GF																			1	-0,02	0,28	-0,31	-0,16	-0,54	0,11	-0,55	-0,17	0,24	-0,46
pH/H ₂ O																				1	0,7	-0,53	0,79	0,13	-0,4	0,17	0,77	-0,52	0,48
pH/KCl																					1	-0,39	0,58	-0,39	-0,1	-0,36	0,57	-0,15	0,42
Al ³⁺																						1	-0,41	-0,05	0,52	-0,05	-0,47	0,57	0,12
Ca ²⁺																							1	0,47	-0,37	0,51	0,97	-0,73	0,64
Mg ²⁺																								1	-0,28	0,99	0,46	-0,67	0,34
H + Al																									1	-0,33	-0,35	0,29	0
S																										1	0,48	-0,66	0,37
V																											1	-0,83	0,65
m																												1	-0,42
P																													1

Em negrito: Significativo a 5 %

^{1/}K, eTh, eU, Ct – gamaespectrometria; ^{2/}Mag – magnetometria; ^{3/}K, P - Extrator Mehlich 1; ^{4/}CO - Carbono orgânico; ^{5/}CTC (r) Capacidade de Troca Catiônica corrigida; ^{6/}Kt – Potássio total – EPA 3052; ^{7/}Areia grossa; ^{8/}Areia fina; ^{9/}S/A = relação silte/argila; ^{10/}ADA – Argila Dispersa em Água; ^{11/}GF – Grau de Floculação; ^{12/}pH em água e KCl - Relação 1:2,5; ^{13/}Al, Ca, Mg, - Extrator: KCl 1 mol/L; ^{14/}H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; ^{15/}S - Soma de Bases Trocáveis; ^{16/}V - Índice de Saturação de Bases; ^{17/}m - Índice de Saturação de Alumínio.

Quadro 7: Coeficientes de correlação linear entre teores de radionuclídeos e alguns atributos físicos e químicos do Horizonte B de 52 perfis de solos

	K ^{1/}	eTh ^{1/}	eU ^{1/}	Mag ^{2/}	Ct ^{1/}	Th/K	Th/U	U/K	K ^{+3/}	CO ^{4/}	Silte	Argila	CTCr ^{5/}	Kt ^{6/}	AG ^{7/}	AF ^{8/}	S/A ^{9/}	ADA ^{10/}	GF ^{11/}	pH/H ₂ O ^{12/}	pH/KCl ^{12/}	Al ^{3+13/}	Ca ^{2+13/}	Mg ^{2+13/}	H + Al ^{14/}	S ^{15/}	V ^{14/}	m ^{14/}	P ^{3/}
K	1	-0,55	-0,58	0,02	-0,31	-0,73	0,08	-0,75	0,18	-0,01	0,21	-0,22	0,2	0,28	-0,12	0,14	0,23	0,09	-0,2	0,24	0,19	-0,25	0,25	0,32	-0,42	0,26	0,33	-0,31	0,08
eTh		1	0,89	0,14	0,93	0,69	-0,51	0,67	-0,13	0,05	-0,55	0,64	-0,46	-0,33	-0,25	-0,55	-0,55	-0,36	0,42	-0,3	-0,09	0,03	-0,3	-0,32	0,29	-0,31	-0,37	0,3	-0,06
eU			1	0,14	0,9	0,66	-0,1	0,66	-0,27	-0,12	-0,48	0,56	-0,55	-0,3	-0,14	-0,42	-0,47	-0,42	0,49	-0,39	-0,15	0,13	-0,42	-0,44	0,31	-0,45	-0,53	0,49	-0,09
Mag				1	0,18	-0,07	-0,08	-0,07	0,09	0,08	-0,1	0,15	-0,07	-0,1	-0,06	-0,21	-0,07	-0,09	0,03	0,02	0,23	-0,04	-0,01	-0,05	-0,07	-0,02	-0,03	0,07	0,24
Ct					1	0,55	-0,37	0,53	-0,17	-0,06	-0,54	0,64	-0,53	-0,26	-0,27	-0,54	-0,52	-0,42	0,46	-0,33	-0,07	-0,01	-0,35	-0,34	0,21	-0,36	-0,42	0,34	-0,06
Th/K						1	-0,2	0,99	-0,16	0,04	-0,24	0,3	-0,09	-0,23	-0,03	-0,26	-0,27	-0,05	0,07	-0,26	-0,06	0,31	-0,14	-0,19	0,46	-0,15	-0,22	0,32	0,19
Th/U							1	-0,16	-0,22	-0,36	0,35	-0,43	0,09	0,18	0,33	0,41	0,36	0,1	-0,1	-0,07	-0,12	0,28	-0,05	-0,14	0,04	-0,09	-0,17	0,26	0,06
U/K								1	-0,17	0,02	-0,22	0,27	-0,09	-0,23	-0,01	-0,24	-0,25	-0,05	0,07	-0,27	-0,08	0,33	-0,14	-0,2	0,47	-0,16	-0,23	0,34	0,18
K ⁺									1	0,27	-0,06	0,07	0,61	-0,05	-0,04	-0,19	-0,07	0,3	-0,4	0,65	0,6	-0,21	0,84	0,46	-0,18	0,84	0,65	-0,53	0,36
CO										1	0,09	-0,01	0,32	-0,28	-0,15	-0,19	0,07	0,18	-0,34	0,14	0,17	-0,12	0,23	0,36	0,05	0,27	0,33	-0,37	0,19
Silte											1	-0,93	0,54	0,31	0,17	0,56	0,94	0,15	-0,5	0,22	-0,14	0,04	0,14	0,42	-0,26	0,18	0,31	-0,16	0,12
Argila												1	-0,51	-0,37	-0,39	-0,72	-0,93	-0,21	0,44	-0,19	0,21	-0,09	-0,12	-0,33	0,23	-0,14	-0,26	0,09	-0,03
CTCr													1	0,04	0,19	0,14	0,51	0,49	-0,78	0,63	0,39	0,04	0,8	0,7	-0,07	0,83	0,83	-0,56	0,48
Kt														1	0,1	0,33	0,33	-0,01	-0,13	0,21	0,04	-0,31	0,08	0,09	-0,48	0,08	0,11	-0,12	-0,19
AG															1	0,29	0,21	0,29	-0,05	0,16	-0,09	0,16	0,04	-0,1	0,03	0,03	0,04	0,07	-0,02
AF																1	0,56	0,1	-0,08	0	-0,21	0	-0,05	0,01	-0,22	-0,06	-0,03	0,09	-0,16
S/A																	1	0,12	-0,46	0,21	-0,14	0,01	0,1	0,46	-0,3	0,15	0,31	-0,14	0,08
ADA																		1	-0,63	0,29	0,29	0,09	0,44	0,29	0	0,44	0,4	-0,29	0,26
GF																			1	-0,51	-0,37	-0,01	-0,59	-0,56	0,11	-0,62	-0,66	0,53	-0,34
pH/H ₂ O																				1	0,68	-0,52	0,81	0,64	-0,57	0,83	0,84	-0,77	0,18
pH/KCl																					1	-0,4	0,73	0,42	-0,51	0,72	0,62	-0,53	0,52
Al ³⁺																						1	-0,24	-0,27	0,68	-0,26	-0,34	0,63	0,28
Ca ²⁺																							1	0,62	-0,33	0,99	0,85	-0,64	0,46
Mg ²⁺																								1	-0,45	0,7	0,87	-0,67	0,33
H + Al																									1	-0,36	-0,44	0,43	0,06
S																										1	0,9	-0,69	0,45
V																											1	-0,82	0,37
m																												1	-0,06
P																													1

Em negrito: Significativo a 5 %

^{1/}K, eTh, eU, Ct – gamaespectrometria; ^{2/}Mag – magnetometria; ^{3/} K, P - Extrator Mehlich 1; ^{4/}CO - Carbono orgânico; ^{5/} CTC (r) Capacidade de Troca Catiônica corrigida; ^{6/} Kt – Potássio total – EPA 3052; ^{7/} Areia grossa; ^{8/} Areia fina; ^{9/}S/A = relação silte/argila; ^{10/}ADA – Argila Dispersa em Água; ^{11/}GF – Grau de Flocculação; ^{12/} pH em água e KCl - Relação 1:2,5; ^{13/} Al, Ca, Mg, - Extrator: KCl 1 mol/L; ^{14/} H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; ^{15/} S - Soma de Bases Trocáveis; ^{16/} V - Índice de Saturação de Bases; ^{17/} m - Índice de Saturação de Alumínio.

2. Análise da imagem magnetométrica em relação aos dados de geologia e pedologia

A partir de uma análise espacial constatou-se maiores concentrações de radionuclídeos nos solos mais argilosos comparativamente aos mais siltosos. Essa diferença pode ser explicada pela maior capacidade de adsorção óxidos de ferro e argilominerais em solos mais argilosos. A ocorrência desses solos mais argilosos referem-se à unidade de mapeamento dos Latossolos Vermelhos coincidiram com as áreas que apresentaram maior intensidade de resposta magnética corroborando a observação no campo em que foram observados perfis magnetização através do imã de mão e teores um pouco mais elevados de ferro comparativamente aos solos perfis de solos estudados em outras áreas do Grupo Bambuí (Achá Panoso et al, 1978; Pereira et al., 2010).

O mapeamento magnetométrico apresentou-se útil para explicar a ocorrência de magnetização em áreas onde este fenômeno é de baixa intensidade, como é o caso da área de estudo. Uma vez que o Grupo Bambuí, no local é constituído essencialmente por siltitos, argilitos, ardósias e calcários.

Entretanto, a intensidade do sinal magnético foi detectada em algumas classes de Cambissolos o que permite inferir que os dados de magnetometria para a delimitação de unidades de mapeamento de solos não consistem de boa ferramenta, uma vez que as medições magnetométricas podem detectar materiais em profundidades que chegam a 200 m. Conforme apresentado na figura 13, a intensidade do sinal magnético na unidade de mapeamento de Cambissolo pode ser explicada pela morfologia destes solos, que por serem rasos, sugerem que o material magnético está intruso nos pelitos. Tal intensidade do sinal é muito inferior comparativamente a grupos geológicos com elevada magnetização como, por exemplo, a que ocorre no domínio geológico do Quadrilátero Ferrífero.

Na área de estudo, foram encontradas nódulos e concreções ferruginosos e não ferruginosos, sendo parte desses magnéticos. A fração magnética deste material foi submetidas às análises químicas e mineralógicas (Quadro 7 e Figura 19).

Os teores de Cr apresentaram-se elevados provavelmente devido à atuação do intemperismo sobre os minerais de cromita. Os elevados teores de Fe extraídos pelo ataque triácido nestas concreções revelaram o predomínio das formas de Fe^{2+} em

estruturas de minerais primários, basicamente silicatos. Esses resultados permitiram constatar a necessidade de ocorrência de material de origem mais rico em Fe para que essas concreções fossem formadas. Estudos anteriores já haviam relatado a presença de materiais mais ricos em ferro no Grupo Bambuí (Viana, 2006; Pereira, 2010).

Quadro 7. Teores de Fe, Cu, Cr, Ni e Zn obtidos em concreções ferruginosas magnéticas do Grupo Bambuí pelo método EPA 3052

Amostra	Fe ₂ O ₃	Cu	Cr	Ni	Zn
	---- dag kg ⁻¹ ----	----- mg kg ⁻¹ -----			
C1	63,91	12	4200	34	42
C2	63,66	17	4700	32	50
C3	63,16	22	4325	47	63

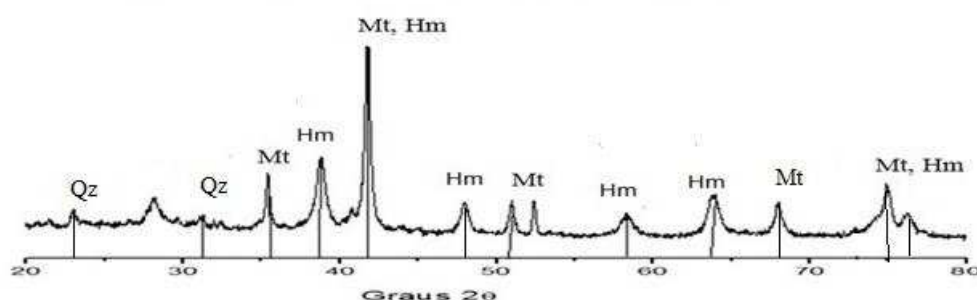


Figura 19: Difratograma de raios X de concreção magnética – Hm: Hematita; Mt: magnetita; Qz: quartzo.

Há incerteza sobre a gênese dos referidos minerais e concreções ferruginosas detectadas por alguns pesquisadores (Viana, 2006; Torres, 2010) no domínio do Grupo Bambuí à despeito da sua litologia. Viana (2006) sugere que estes materiais podem ser alóctones ao Grupo Bambuí e que foram trazidos por canais de paleodrenagem, ou também que poderia ser oriundos da transformação pelo fogo de hematita em magnetita. Estudos anteriores já haviam relatado formação desses óxidos a partir da presença de elevadas temperaturas, associadas à presença de matéria orgânica, em solos ricos em Fe ou ainda pela presença de elevadas temperaturas no solo pela ação do fogo (Schwertmann, 1971).

A magnetometria apresentou-se adequada para o auxílio na delimitação das unidades de mapeamento dos Latossolos, uma vez que neste domínio geológico estudado essa é a classe com maior susceptibilidade magnética.

A análise do mapa de magnetometria da área (Figura 20) permitiu a constatação de extenso alinhamento magnético em Minas Gerais no sentido NW/SE, resultado dos diques básicos identificados na parte sul do cráton São Francisco e datado do período Cretáceo (Costa et al., 2012). Alguns estudos apontam para que a coincidência entre estes diques da região sul do Cráton com basaltos toleíticos da parte norte da Bacia do Paraná (Pinto, 2009). O mapa de magnetometria da área (Figura 20) corrobora a hipótese de que a existência desse alinhamento aponta para a possibilidade de existência de diques, uma vez que em alguns locais este coincide com unidades de mapeamento de Latossolos Vermelhos, nas quais, como o auxílio do imã de mão foram detectadas magnetização nos perfis de solos. Em algumas áreas, ainda que não aflorantes a existência de um material mais rico em Fe que um paleoclima pode ter contribuído para a acumulação deste elemento na forma de concreções ferruginosas.

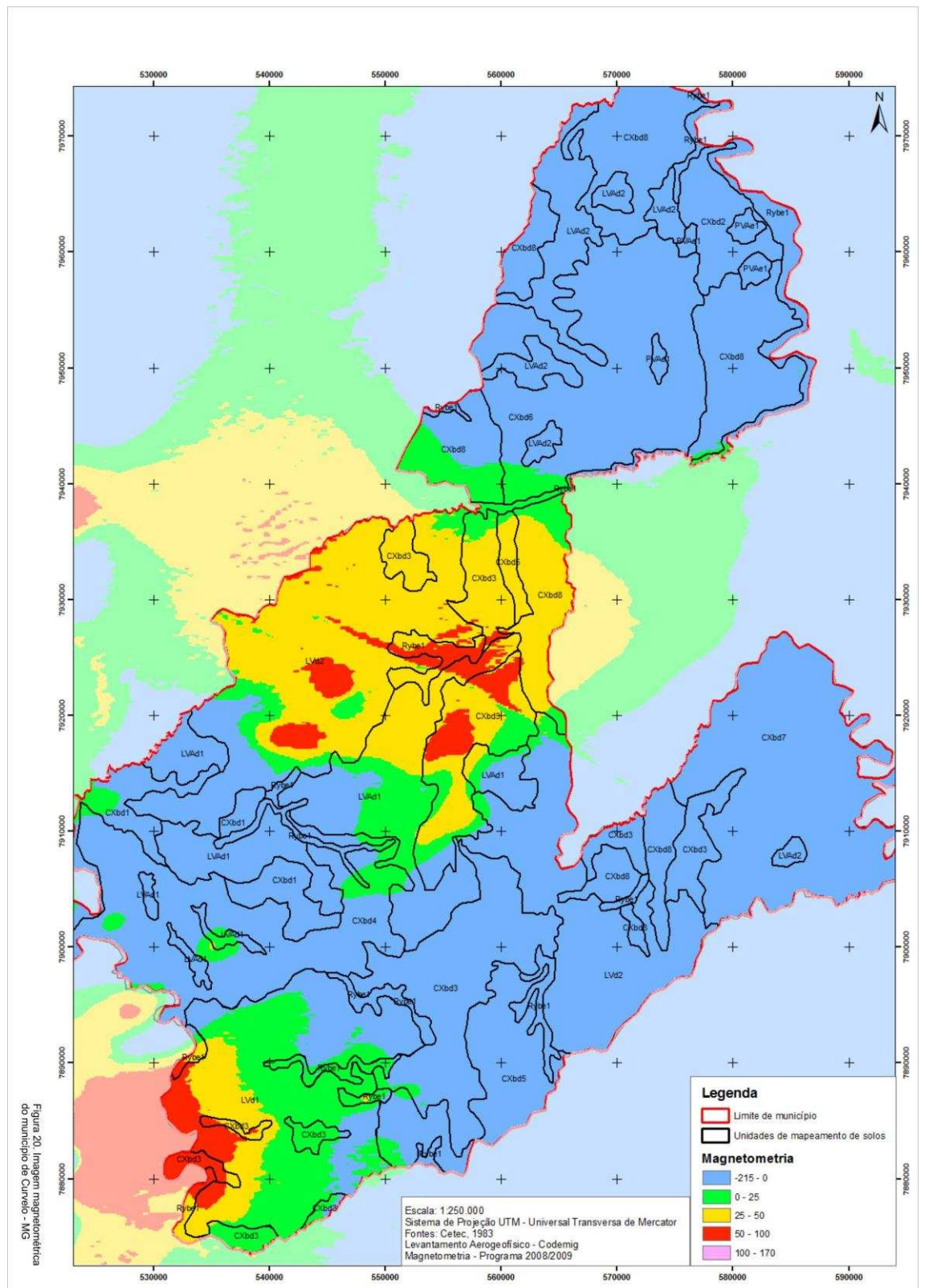


Figura 20. Imagem magnetométrica do município de Curvelo – MG.

5. CONCLUSÕES

1. Predominam na área as classes de solos Cambissolos Háplicos (54,19 %), Latossolos Vermelho-Amarelos (11,89 %) e Latossolos Vermelhos (25,86 %).
2. As concreções ferruginosas encontradas em alguns pontos da área estudada são magnéticas e não magnéticas. Nas concreções ferruginosas magnéticas constatou-se elevados teores de Cr.
3. A congruência nos limites das unidades de mapeamento com a distribuição dos elementos (K, eU e eTh) apresentou-se satisfatória e a metodologia utilizada pode ser facilmente reproduzida.
4. Na área estudada a associação direta do K com a litologia, devido à presença desse elemento na estrutura dos minerais primários contribui para a relação entre os teores de K com os limites das unidades de mapeamento.
5. As classes de solos de textura mais argilosa retém mais radionuclídeos comparativamente às classes de textura mais siltosa tornando os teores de eU e eTh adequados para a predição da textura dos solos.
6. A estreita relação entre os mapas de magnetometria, mapa de solos, geologia e dados aerogamaespectrométricos demonstra a importância da geofísica como ferramenta para auxiliar no mapeamento de solos.
7. A determinação dos radionuclídeos (K, eU e eTh) por aerogamaespectrometria apresenta avanço em relação à densidade de amostragem, impraticável em laboratório em função do custo, morosidade e periculosidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHÁ PANOSO, L. **Levantamento de reconhecimento detalhado dos solos da área sob a influência do reservatório de Três Marias**. Belo Horizonte, MG: EPAMIG, 1978, 236 p. (Boletim Técnico SNLCS, 57).
- ALKMIM, F. F., BRITO NEVES, B. B., ALVES, J. A. C. Arcabouço tectônico do cráton São Francisco - Uma Revisão. In: **SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO. REUNIÃO PREPARATÓRIA**. Salvador, SBG/SGM/CNPq, 1993. p. 45-62.
- ANDRADE, J. C.; ABREU, M. F. Instrumentação básica e medidas analíticas. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Org.) **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. 1 ed. Campinas: IAC, 2001. p.78-135.
- BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e suscetibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, 23:371-405, 2005.
- BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F.; CABRAL, J.B.P.; RAFAELLI NETO, S.L. Gamma-ray spectrometry sensor and geochemical prospecting in an area of sugar cane plantation. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 51:1-10, 2008.
- BLAKELY, R. J. **Potential theory in gravity and magnetic applications**. 1 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 441p.
- BOYLE, R. W. Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. **Developments in Economic Geology**, 16:71-78, 1982.
- CARRINO, T. A.; SOUZA FILHO, C. R.; LEITE, E. P. Avaliação do uso de dados aerogeofísicos para mapeamento geológico e prospecção mineral em terrenos intemperizados: o exemplo de Serra Leste, Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geofísica**, 25:307-320, 2007.
- CARVALHO, M. T. N. **Integração de dados geológicos, geofísicos e geoquímicos aplicados à prospecção de ouro nos greenstone belts de Pilar de Goiás e Guarinos, GO**. 1999. 187 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1999.
- CHAGAS, C. S; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CARVALHO JÚNIOR, W. Atributos topográficos e dados do Landsat7 no mapeamento digital de solos com redes neurais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 45:497-507, 2010.
- CODMIG & CPRM, **Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais área 3 - Belo Horizonte - Curvelo - Três Marias**. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos, 2010. 186p.

- COEY, J. M. D. Magnetic properties of iron oxides and clay minerals. In: STUCKI, J. W.; GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. (Ed.) **Iron in Soils and Clay Minerals**. 217 Reidel, NATO ASI, Series C, 1988. p.397-466.
- COSTA, M. G. A. **Mineralogia e mapeamento de solos desenvolvidos de rochas pelíticas em Curvelo - Minas Gerais**. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.
- COSTA, R. D. C.; KNAUER, L. G.; PREZOTTI, F. P. S.; DUARTE, F. T. D.; FONSECA, H. A. M. **Projeto Curvelo, Belo Horizonte, CPRM: escala: 1:100.000**. Geologia da Folha Curvelo SE.23-Z-A-V, CPRM, 2012. 50 p.
- CULLITY, B. D; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. Addison Wesley Publishing Company, 1972. 181p.
- CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of American Journal**, 51:153-158, 1987.
- DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17:187-200, 1997.
- ELAWADI, I. A; AMMAR, A. A; ELSIRAFY, A. Mapping surface geology using airborne gamma-ray spectrometric survey data - a case study. In: SEGI INTERNATIONAL SYMPOSIUM-IMAGING TECHNOLOGY, 7., 2004, Sendai. **Proceedings...** Sendai, Japan, 2004. p. 349-354.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos, Rio de Janeiro. 1997. 212p
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- EPA 3052. **Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices**. Washington, USA, 1996.
- ERBE, P; SCHULER, U; STAHR, K; HERMANN, L. Evaluation of gamma-ray spectrometry as a tool for soil science. In: INTERNATIONAL CONFERENCE "SUSTAINABLE LAND USE AND RURAL DEVELOPMENT IN MOUNTAIN AREAS", 2012, Hohenheim, Stuttgart. **Annais...** Hohenheim, Stuttgart, Germany, 2012. CD-ROM.
- ESRI. **ARCGIS 9.0**. ArcGis Network Analyst Tutorial, 2006. 82p.
- FABRIS, J. D. & COEY, J. M. D. Espectroscopia Mössbauer do ^{57}Fe e medidas magnéticas na análise de geomateriais. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. M. V. & COSTA, L. M. (Ed). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2, p.47-102.

- FERREIRA, F. J. F. & SOUZA, J. L. **Gamaespectrometria - Fundamentos, Geoquímica e Distribuição dos Radioelementos em Rochas e Solos**. LPGA, Departamento Geologia/UFPR. Curitiba, 2002. 72 p.
- FORNAZZARI NETO, L.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá, SC. **Revista Brasileira de Geociências**, 33:197-208, 2003.
- FUNDAÇÃO CETEC. **Levantamento dos Recursos Naturais do Alto São Francisco. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais**. Escala de 1:250.000. 1983.
- GODOY, L. C.; BITTENCOURT, A.L.B.; SANTOS, L. J. C.; FERREIRA, F. J. F. Distribuição de K, eU e eTh e avaliação da dose anual de radiação na região do Granito Serra do Carambeí - PR. **Revista Brasileira de Geofísica**, 29:359-375, 2011.
- HERMANN, L.; SCHULER, U.; RANGUBPIT, W.; ERBE, P.; SURINKUM, A.; ZAREI, M.; STAHR, K. The potencial of gamaespectrometry for soil mapping. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 19., Brisbane, Australia. **Proceedings...** Brisbane, 2010. DVD.
- HILDEBRAND, J. D. “Aerogeofísica no Brasil e a Evolução das Tecnologias nos Últimos 50 anos”, In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 1., São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, 2004. p.1-8. CD-ROM.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Projeção Universal Transversa de Mercator**. Cartas. Escala 1:100.000. 1979.
- LA TERRA, E. F.; MENEZES, P. T. L.; FONTES, S. L. Metodologia exploratória para demilitação de condutos vulcânicos kimberlíticos com o uso do método CSAMT, MG, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, 28:357-370, 2010.
- LAEDERMANN, J. P.; BYRDE, F.; MURITH, C. In-situ gamma-ray spectrometry: the influence of topography on the accuracy of activity determination. **Journal of Environmental Radioactivity**, 38:1-16, 1998.
- LANGMUIR, D.; HERMAN, J. S. The mobility of thorium in natural waters low temperatures. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 44:1753-1766, 1980.
- LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York, John Wiley & Sons, 1979. 449p.
- LOCKE, C. A.; JOHNSON, S. A.; CASSIDY J.; MAUK, J. Geophysical exploration of the Puhupuhi epithermal area, Northland, New Zealand. **Journal of Geochemical Exploration**, 65: 91-109, 1999.
- MAAS, M. V. R.; OLIVEIRA, C. G.; PIRES, A. C. B.; MORAES, R. A. V. Aplicação da Geofísica aérea na exploração mineral e mapeamento geológico do setor sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe. **Revista Brasileira de Geociências**, 33:279-288, 2003.

- McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, 97:293-327, 2000.
- MERNAGH, T. P.; MIEZITIS, Y. **A review of the geochemical processes controlling the distribution of thorium in the Earth's Crust and Australia's thorium resources**. Geoscience, Australia Record, 2008. 48p.
- MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17:39-50, 1997.
- MINTY, B. R. S.; LUYENDYK, A. P. J.; PRODIE, R. C. Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17:51-62, 1997.
- MOREIRA, C. A.; LOPES, S. M.; SCHWEIG, C. Polarização Induzida aplicada no estudo de ocorrência de cobre localizada a noroeste de Capaçava do Sul - RS. **Geociências** (São Paulo. Online), 31: 321-330, 2012.
- NASCIMENTO, C. T. C.; PIRES, A. C. B.; MORAES, R. A. V. Reconhecimento de solos por meio de resistividade elétrica e radiação gama. **Revista Brasileira de Geofísica**, 34: 383-392, 2004.
- NETO, L. F.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha de Botuverá, SC. **Revista Brasileira de Geociências**, 33:197-208, 2003.
- NIR-EL, Y.; LAVI, N.; NE'EMAN, BRENNER, S.; HAQUIN, G. In situ gamma-ray spectrometric measurement of uranium in phosphate soils. **Journal of Environmental Radioactivity**, 45:185-190, 1998.
- OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das Radiações**. São Paulo, Ed. Oficina de Textos, 2010. v. 1. 296p.
- ONIP, ON. **Situação da Sísmica Terrestre no Brasil: Projeto ONIPGEO**. CTPetro, FINEP, 2003.
- PEREIRA, T. C. C. **Gênese, classificação e mapeamento de solos desenvolvidos de rochas pelíticas no município de Curvelo - MG**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.
- PEREIRA, T. T. P.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; ALMEIDA, C. C. Gênese de Latossolos e Cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do Grupo Bambuí - Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1283-1295, 2010.
- PÉREZ, D. V.; SALDANHA, M. F. C.; MOREIRA, J. C.; VAITSMAN, D. S. Concentração total de urânio e tório em alguns solos brasileiros. **Notas Científicas. Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 33:1417-1423, 1998.

- PHILLIPS, J. D. **Potential Field Geophysical Software for the Pc, version 2.2: USGS Open-file Report 97-725, 1997. 34p.** Disponível em: <ftp://ftpext.usgs.gov/pub/cr/co/denver/musette/pub/pf/>. Acesso em: 14 jul. 2008.
- PINTO, L. G. R. P. **Interpretação de dados gravimétricos e eletromagnéticos do sul do Cráton São Francisco: novos modelos crustais e litosféricos.** 2009. 146 f. Tese (Doutorado em Geofísica). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.
- RAIJ, B. van **Avaliação da fertilidade do solo.** Piracicaba: Instituto do Potássio e Fósforo, 1983. 142p.
- REBELO, A. M. A. **Processos supergênicos na distribuição de radônio em paisagens tropicais úmidas.** 2000. 209 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2000.
- REID, A. B.; ALLSOP, J. M.; GRANSER, H, MILLETT, A. J.; SOMERTON, I. W. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. In: **Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists**, 58, 1990.
- RIBEIRO, G. A. P. As propriedades magnéticas da matéria: Um primeiro contato. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 22:299-305, 2000.
- RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:297-300, 2005.
- RUY, A. C.; SILVA, A. M.; TOLEDO, C. L. B.; SOUZA FILHO, C. R. Uso de dados aerogeofísicos de alta densidade para mapeamentos geológicos em terrenos altamente intemperizados: o estudo de caso da Região de Cláudio, Porção sul do Cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, 24:535-546, 2006.
- SAMPAIO, L. C.; GARCIA, F. CERNICCHIARIO, G. R. C.; TAKEUCHI, A. Y. Técnicas de magnetometria. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 22:406-410, 2000.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solos no campo.** 5.ed. Viçosa, MG: SBCS, 2005. 92p.
- SAPUCAIA, N. S.; ARGOLLO, R. M.; BARBOSA, J. S. F. Teores de potássio, urânio, tório e taxa de produção de calor radiogênico no embasamento adjacente às Bacias Sedimentares de Camamu e Almada, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, 23:453-475, 2005.
- SCHWERTMANN, U. Transformation of hematite to goethite in soils. **Nature**, 232: 624, 1971.
- SIAL, A.; McREATH, I. **Petrologia Ígnea.** SBG/CNPq/Bureau. Salvador, 1984. 181p.
- SILVA, S. M. P.; CROSTA, A. P.; FERREIRA, F. J. F.; BEURLIN, H.; SILVA, A. M.; SANTOS, L. F. Espectrometria de raios gama de granitos pegmatíticos da Província pegmatítica da Borborema (PPB), Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, 28:673-690, 2010.

- SOUZA, J. L.; FERREIRA, F. J. F. Anomalias aerogamaespectrométricas (K, eU, eTh) da Quadricula de Araras (SP) e suas relações com processos pedogenéticos e fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Geofísica**, 23:251-274, 2008.
- STASOFT, Inc. **STATISTICA (data analysis software system)**, version 8.0. 2007. Disponível em: <<http://www.stasoft.com>>.
- STRAHLER, A.; STRAHLER, A. N. **Physical geography: science and systems of the human environment**. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2002. 748p.
- TAYLOR, M. J; SMETTEM, K; PRACILIO, G; VERBOOM, W. Relationships between soil properties and high-resolution radiometrics, central eastern Wheatbelt, Western Austrália. **Exploration Geophysics**, 33:95-102, 2002.
- TEIXEIRA, A. A.; SILVA, A. M.; PIRES, A. C. B.; MORAES, R. A. V.; SOUZA FILHO, C. R. Integração e análise de dados aerogeofísicos por meio da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e classificação não supervisionada: o exemplo do Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Geofísica**, 24:559-572, 2006.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERI, R. E. **Applied Geophysics**. 2nd. ed. Cambridge University Press, Cambridge. 1990.
- TULLER, M. P.; RIBEIRO, J. H.; SIGNORELLI, N.; FÉBOLI, W. L.; PINHO, J. M. M. (Org). **Projeto Sete Lagoas - Abaeté**. Belo Horizonte, CPRM: 2010. 06 mapas geológicos, escala: 1:100.000. Geologia da folha Sete Lagoas SE.23-Z-C-II. 160p.
- VIANA, J. H. M.; COUCEIRO, P. R. C.; PEREIRA, M. C.; FABRIS, J. D.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. G. R.; RECHEMBERG, H. R; MANTOVANI, E. C. Occurrence of magnetite in the sand fraction of an Oxisol in the Brazilian savanna ecosystem, developed from a magnetite-free lithology. **Australian Journal of Soil Research**, 44:1-13, 2006.
- WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 17:201-216. 1997.

APÊNDICE

Quadro 1A. Atributos físicos utilizados na correlação linear simples de 47 perfis de solos da área de estudo para o horizonte A

Perfil	Classe	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S/A ^{3/}	ADA ^{4/}	GF ^{5/}	CO ^{6/}
		----- dag kg ⁻¹ -----					----- dag kg ⁻¹ -----		
1	LV	2	2	20	76	0,26	18	77	1,50
2	LV	2	1	14	83	0,17	2	99	1,85
3	LV	2	2	22	74	0,30	29	66	1,78
4	CX	10	11	43	36	1,19	12	67	1,42
5	CX	4	12	49	44	0,91	16	65	1,13
6	CX	9	13	48	30	1,60	9	69	1,05
7	CX	9	9	34	48	0,71	13	83	1,03
8	CX	4	2	39	55	0,71	25	55	1,40
9	CX	9	12	27	52	0,52	16	77	1,26
10	LVA	6	4	33	57	0,58	21	64	1,28
11	CX	3	17	41	39	1,10	3	92	1,33
12	CX	3	7	47	43	1,10	1	98	1,35
13	CX	0	7	39	54	0,70	2	96	1,66
14	CX	13	7	50	30	1,70	1	97	1,31
15	CX	8	12	51	29	1,70	1	97	1,58
16	CX	2	9	54	35	1,50	12	66	1,40
17	LV	4	1	19	76	0,30	9	88	1,78
18	LV	5	2	19	74	0,30	3	96	1,72
19	LV	3	1	36	60	0,60	1	98	1,92
20	LVA	2	4	36	58	0,60	2	97	1,61
21	LVA	2	6	31	61	0,50	2	97	1,52
22	LVA	0	1	31	68	0,50	3	96	1,77
23	LVA	1	5	21	73	0,30	1	99	1,50
24	CX	3	4	57	36	1,58	18	50	2,45
25	CX	12	8	52	28	1,86	11	61	2,33
26	CX	1	16	47	36	1,31	11	69	2,35
27	CX	7	10	54	29	1,86	17	41	1,57
28	CX	2	11	54	33	1,64	10	70	2,22
29	LV	4	2	24	70	0,34	2	97	1,16
30	LV	1	1	17	81	0,21	27	67	3,00
31	LV	1	2	11	86	0,13	14	84	3,78
32	LV	1	1	19	79	0,24	27	66	3,65
33	LV	1	2	13	84	0,15	10	88	3,52
34	LV	5	2	12	81	0,15	23	72	3,13
35	LV	11	4	31	54	0,57	26	52	2,74
36	LV	2	3	21	74	0,28	28	62	2,61
37	LVA	18	7	34	41	0,83	41	78	2,07
38	LVA	8	4	35	53	0,66	17	68	2,71
39	FX	5	8	47	40	1,18	11	73	2,07
40	GX	8	6	45	41	1,10	8	80	2,20
41	RL	2	5	52	41	1,27	4	90	6,14
42	RY	1	4	45	50	0,90	14	72	6,46
43	CX	6	2	48	44	1,09	20	55	5,09
44	PV	5	2	39	54	0,72	39	54	4,30
45	LVA	3	1	38	58	0,66	27	53	3,13
46	CY	3	5	54	38	1,42	12	68	4,17
47	CY	5	8	57	35	15,00	57	5	22,50

^{1/} AG - Areia grossa; ^{2/} AF - Areia fina; ^{3/} S/A - relação silte/argila; ^{4/} ADA - Argila Dispersa em Água; ^{5/} GF - Grau de Floculação; ^{6/} CO - Carbono orgânico.

Quadro 2A. Atributos químicos utilizados na correlação linear simples de 47 perfis de solos da área de estudo para o horizonte A

Perfil	Classe	P ^{1/}	CTCr ^{2/}	K ^{+ 1/}	Ca ^{2+ 3/}	Mg ^{2+ 3/}	Al ^{3+ 3/}	H+AL ^{4/}	S ^{5/}	V ^{6/}	m ^{7/}	pH/H ₂ O ^{8/}	pH/KCl ^{8/}
		mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³					%		
1	LV	0,60	9,95	0,16	0,23	0,27	1,15	6,90	0,66	8,70	63,50	4,37	3,78
2	LV	1,00	8,80	0,18	0,29	0,43	1,64	6,40	0,90	12,30	64,60	4,72	3,90
3	LV	0,80	10,55	0,20	0,23	0,48	1,64	6,90	0,91	11,70	64,30	4,74	3,87
4	CX	0,20	14,50	0,07	0,20	0,15	0,85	4,80	0,42	8,40	66,90	5,03	3,70
5	CX	0,40	12,20	0,16	0,35	0,36	0,70	4,50	0,87	16,20	44,60	4,82	3,86
6	CX	0,30	14,77	0,05	0,18	0,10	0,60	4,10	0,33	7,40	64,50	4,92	3,85
7	CX	0,30	10,88	0,04	0,30	0,08	0,85	4,80	0,42	8,00	66,90	5,36	3,81
8	CX	0,90	13,44	0,17	0,20	0,12	2,77	6,90	0,49	6,60	85,00	4,56	3,65
9	CX	1,40	12,71	0,13	0,22	0,16	2,36	6,10	0,51	7,70	82,20	4,74	3,71
10	LVA	0,30	10,61	0,22	0,17	0,36	0,75	5,30	0,75	12,40	50,00	4,68	3,76
11	CX	0,10	14,10	0,03	0,20	0,15	1,00	5,10	0,41	7,40	70,90	4,10	3,60
12	CX	0,20	14,10	0,10	0,17	0,14	1,00	5,60	0,44	7,30	69,40	5,00	3,70
13	CX	0,10	10,80	0,09	0,26	0,17	1,10	5,30	0,55	9,40	66,70	4,80	3,70
14	CX	0,10	19,20	0,03	0,19	0,13	1,02	5,40	0,36	6,30	73,90	4,90	3,50
15	CX	0,20	19,80	0,09	0,20	0,14	1,07	5,30	0,45	7,80	70,40	4,90	3,80
16	CX	0,40	18,60	0,20	0,30	0,30	1,15	5,70	0,83	12,70	58,10	4,70	3,80
17	LV	0,20	5,50	0,07	0,29	0,11	0,50	3,70	0,49	11,70	50,50	5,10	4,00
18	LV	0,50	10,50	0,27	0,36	0,16	1,00	7,00	0,80	10,30	55,60	5,10	3,70
19	LV	0,60	13,80	0,17	0,23	0,29	1,00	7,60	0,70	8,40	58,80	4,50	3,70
20	LVA	0,30	11,30	0,18	0,41	0,16	1,00	5,80	0,76	11,60	56,80	4,10	3,80
21	LVA	0,30	10,70	0,07	0,44	0,18	1,00	5,80	0,71	10,90	58,50	5,10	3,70
22	LVA	0,40	4,70	0,16	0,21	0,19	1,00	2,60	0,58	18,20	63,30	4,50	3,80
23	LVA	0,20	11,30	0,19	0,35	0,60	1,00	7,10	1,15	13,90	46,50	4,30	3,80
24	CX	2,30	15,47	0,07	0,54	0,06	1,64	4,90	0,67	12,00	71,00	4,66	3,91
25	CX	3,50	26,82	0,18	1,56	0,37	0,92	5,40	2,11	28,10	30,40	5,15	3,94
26	CX	1,90	13,58	0,12	0,14	0,03	1,33	4,60	0,29	5,90	82,10	4,76	3,97
27	CX	2,00	19,83	0,13	0,32	0,10	2,67	5,20	0,55	9,60	82,90	4,68	3,74
28	CX	2,20	11,73	0,06	0,18	0,03	1,23	3,60	0,27	7,00	82,00	4,66	3,91
29	LV	1,40	7,71	0,06	0,21	0,03	1,54	5,10	0,30	5,60	83,70	5,06	4,20
30	LV	1,80	9,25	0,38	0,21	0,30	1,13	6,60	0,89	11,90	55,90	5,04	4,10
31	LV	2,10	9,31	0,05	0,16	0,20	1,33	7,60	0,41	5,10	76,40	4,62	4,10
32	LV	1,90	9,87	0,23	0,19	0,28	1,54	7,10	0,70	9,00	68,80	4,91	4,10
33	LV	1,80	8,98	0,11	0,28	0,25	1,23	6,90	0,64	8,50	65,80	4,88	4,13
34	LV	1,90	8,28	0,11	0,18	0,12	1,13	6,30	0,41	6,10	73,40	4,76	4,25
35	LV	2,60	16,70	0,52	0,22	0,18	3,18	8,10	0,92	10,20	77,60	4,59	3,78
36	LV	1,90	8,20	0,15	0,17	0,15	1,33	5,60	0,47	7,70	73,90	4,95	4,11
37	LVA	2,30	20,05	0,15	0,75	0,22	2,15	7,10	1,12	13,60	65,70	4,69	4,04
38	LVA	4,00	15,89	0,50	1,45	0,57	0,82	5,90	2,52	29,90	24,60	5,08	4,06
39	FX	3,20	23,45	0,13	0,49	0,26	3,79	8,50	0,88	9,40	81,20	4,44	3,77
40	GX	2,70	21,61	0,11	0,41	0,24	3,49	8,10	0,76	8,60	82,10	4,41	3,80
41	RL	3,40	36,15	0,22	7,53	1,97	0,00	5,10	9,72	65,60	0,00	5,67	4,86
42	RY	2,70	30,56	0,14	7,11	1,23	0,10	6,80	8,48	55,50	1,20	5,61	4,59
43	CX	5,60	41,39	0,93	13,60	2,68	0,00	1,00	17,21	94,50	0,00	6,90	6,11
44	PV	2,40	22,44	0,52	3,89	1,31	0,21	6,40	5,72	47,20	3,50	5,34	4,40
45	LVA	2,20	15,09	0,29	0,21	0,25	3,49	8,00	0,75	8,60	82,30	4,72	3,84
46	CY	2,90	25,18	0,19	2,71	0,87	0,51	5,80	3,77	39,40	11,90	5,24	4,22
47	CY	2,00	30,29	0,33	1,25	6,60	2,42	4,00	37,70	14,90	2,00	4,07	0,70

^{1/} K, P - Extrator Mehlich ^{2/} CTCr – Capacidade de troca catiônica corrigida; ^{3/} Al, Ca, Mg, - Extrator: KCl 1 mol/L; ^{4/} H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; ^{5/} S - Soma de Bases Trocáveis; ^{6/} V - Índice de Saturação de Bases; ^{7/} m - Índice de Saturação de Alumínio; ^{8/} pH em água e KCl - Relação 1:2,5.

Quadro 3A. Teor de K total, teores dos radionuclídeos e magnetometria utilizados na correlação linear simples de 47 perfis de solos da área de estudo para o horizonte

A

Perfil	Classe	Kt ^{1/}	K ^{2/}	eTh ^{2/}	eU ^{2/}	Mag ^{3/}	Ct ^{2/}	Th/K	Th/U	U/K
		dag kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		T				
1	LV	1,82	1,02	18,48	6,75	-27,66	11,69	20,82	0,37	7,46
2	LV	1,58	1,25	22,57	8,11	-24,89	13,69	20,93	0,36	7,10
3	LV	1,05	1,17	23,46	7,69	-31,18	13,19	21,42	0,34	7,17
4	CX	3,66	0,38	14,54	6,55	-25,67	9,09	27,08	0,44	13,03
5	CX	3,12	1,12	17,46	5,95	-26,09	11,14	20,27	0,36	7,87
6	CX	3,86	0,66	14,29	5,66	-26,90	9,04	17,99	0,40	7,57
7	CX	2,62	0,85	16,79	6,74	-26,17	11,10	23,13	0,40	9,04
8	CX	2,77	1,10	19,83	6,63	-28,10	11,90	23,62	0,35	8,55
9	CX	3,10	0,70	14,04	6,13	-27,96	8,31	18,49	0,41	7,55
10	LVA	2,30	0,86	20,22	6,58	-27,63	11,92	23,48	0,34	7,64
11	CX	3,38	1,00	14,69	5,38	-25,95	9,37	16,95	0,37	5,95
12	CX	3,58	0,98	14,62	5,15	-59,60	9,72	15,02	0,38	5,50
13	CX	4,06	1,05	13,69	4,86	-98,75	9,10	15,19	0,34	5,11
14	CX	3,02	0,52	18,41	6,19	-24,16	10,39	51,09	0,36	16,37
15	CX	2,47	0,64	14,81	6,48	-15,09	9,98	22,69	0,43	10,72
16	CX	1,23	0,92	14,84	4,75	-22,37	9,41	20,44	0,34	6,24
17	LV	0,99	0,57	21,88	7,73	-28,25	11,79	30,64	0,36	11,48
18	LV	1,87	0,76	19,01	6,84	-19,85	11,11	24,87	0,37	9,33
19	LV	0,81	0,77	20,91	6,50	-9,72	11,71	21,59	0,33	6,90
20	LVA	2,58	1,00	14,54	5,26	-21,73	9,95	14,63	0,37	5,29
21	LVA	2,58	1,12	12,98	3,17	-31,57	8,28	14,90	0,31	4,40
22	LVA	2,48	0,99	19,47	6,57	-97,60	11,81	16,82	0,36	6,08
23	LVA	1,20	0,69	14,22	5,57	-36,62	9,27	22,61	0,34	7,28
24	CX	2,22	1,75	13,35	5,63	-42,10	11,19	13,95	0,42	5,48
25	CX	1,53	0,85	12,20	6,07	-30,43	9,08	16,42	0,47	6,98
26	CX	1,78	1,26	13,93	5,20	-81,96	9,28	12,17	0,38	5,12
27	CX	1,63	0,75	11,33	3,75	-38,25	7,39	16,38	0,37	5,85
28	CX	1,43	1,23	14,37	6,68	-5,18	10,90	12,18	0,45	5,80
29	LV	2,12	0,68	23,06	7,03	-34,22	12,20	69,50	0,32	20,43
30	LV	1,81	1,06	26,42	7,65	-44,83	14,62	36,19	0,28	10,24
31	LV	1,87	0,05	29,46	9,15	-48,85	13,90	295,37	0,31	92,20
32	LV	1,83	0,53	24,09	7,74	-39,84	12,87	38,58	0,33	12,66
33	LV	1,59	1,07	20,14	6,58	-48,01	11,79	42,53	0,33	12,36
34	LV	1,53	0,94	10,71	5,52	-32,18	9,01	12,70	0,42	5,38
35	LV	1,63	0,01	29,55	9,77	-156,67	14,82	306,68	0,36	99,23
36	LV	1,67	0,67	24,84	7,65	-47,31	13,50	59,97	0,30	15,55
37	LVA	1,33	0,80	12,02	4,42	-35,97	8,11	15,73	0,39	5,78
38	LVA	1,92	1,24	12,26	4,13	-2,95	8,44	11,51	0,35	4,35
39	FX	0,72	0,04	20,37	6,73	-32,31	9,94	151,05	0,36	51,23
40	GX	0,70	0,93	13,35	5,96	-30,55	9,66	29,22	0,46	10,21
41	RL	2,49	1,37	11,67	3,40	-37,16	8,48	9,91	0,31	3,16
42	RY	2,12	1,24	12,26	4,13	-2,95	8,44	11,51	0,35	4,35
43	CX	1,83	1,26	11,89	3,70	-16,57	8,11	10,34	0,34	3,49
44	PV	1,92	1,08	18,27	5,68	-6,42	10,76	16,27	0,33	4,60
45	LVA	2,22	0,30	22,82	7,93	-35,39	12,18	114,85	0,35	45,39
46	CY	1,19	1,04	9,47	3,02	-52,69	6,87	10,92	0,42	4,26
47	CY	0,33	0,69	17,35	4,54	-29,54	8,75	20,40	0,27	5,53

^{1/} Kt – Potássio total – EPA 3052; ^{2/} K, eTh, eU, Ct – gamaespectrometria; ^{3/} Mag – magnetometria

Quadro 4A. Atributos físicos utilizados na correlação linear simples de 52 perfis de solos da área de estudo para o horizonte B

Perfil	Classe	AG ^{1/}	AF ^{2/}	Silte	Argila	S/A ^{3/}	ADA ^{4/}	GF ^{5/}	CO ^{6/}
				dag kg ⁻¹					

1	LV	2	2	17	79	0,22	1	100	0,75
2	LV	2	1	14	83	0,17	2	99	0,74
3	LV	1	1	22	76	0,29	1	100	0,74
4	LV	2	2	18	78	0,23	3	95	1,04
5	LV	4	2	19	75	0,25	1	99	0,81
6	CX	5	7	37	51	0,73	9	80	0,30
7	CX	4	10	37	49	0,76	6	87	0,67
8	CX	4	11	49	36	1,36	7	85	0,52
9	CX	9	8	36	47	0,77	2	96	0,75
10	CX	5	1	30	64	0,47	1	100	0,66
11	CX	5	6	38	51	0,75	2	99	0,44
12	LVA	5	3	29	63	0,46	4	93	0,75
13	LVA	2	2	27	69	0,39	1	100	0,69
14	CX	3	13	46	38	1,20	2	95	1,24
15	CX	3	7	43	47	0,90	1	98	0,99
16	CX	0	6	34	60	0,60	6	90	0,66
17	CX	10	3	52	35	1,50	2	94	0,51
18	CX	7	7	53	33	1,60	2	94	0,61
19	CX	2	9	50	39	1,30	2	95	0,85
20	LV	3	1	20	76	0,30	1	99	0,97
21	LV	4	1	22	73	0,30	1	99	1,01
22	LV	2	4	27	67	0,40	3	96	0,87
23	LVA	2	5	29	64	0,50	18	72	0,63
24	LVA	2	6	32	60	0,50	10	83	0,56
25	LVA	1	1	34	64	0,50	22	66	1,05
26	LVA	1	4	25	70	0,40	8	89	0,89
27	CX	2	3	55	40	1,38	19	53	1,81
28	CX	11	6	50	33	1,52	11	67	0,78
29	CX	1	11	49	39	1,26	1	97	1,04
30	CX	6	7	49	38	1,29	8	79	0,52
31	CX	0	9	55	36	1,53	2	94	0,91
32	LV	5	1	25	69	0,36	-	100	0,90
33	LV	1	0	13	86	0,15	1	99	1,83
34	LV	1	1	16	82	0,20	12	85	1,96
35	LV	1	0	15	84	0,18	1	99	1,43
36	LV	1	1	12	86	0,14	2	98	2,09
37	LV	4	2	13	81	0,16	1	99	1,70
38	LV	8	4	31	57	0,54	6	89	1,30
39	LV	1	2	23	74	0,31	1	99	1,57
40	LV	3	6	29	62	0,47	1	98	1,57
41	LV	1	1	34	91	0,07	1	99	1,04
42	LVA	12	7	24	57	0,42	57	96	0,78
43	LVA	4	3	31	62	0,27	1	99	1,30
44	FX	2	4	38	56	0,68	20	64	0,90
45	GX	4	4	33	59	0,56	3	95	0,78
46	RL	2	3	65	30	2,17	13	57	1,16
47	RY	12	9	34	48	0,58	15	70	1,16
48	CXV	4	3	32	61	0,52	31	49	1,96
49	PV	2	2	34	62	0,55	3	95	1,43
50	LVA	3	1	36	60	0,60	1	98	0,91
51	CY	1	3	50	46	1,09	22	52	2,09
52	CY	3	3	52	42	1,24	17	60	8,20

^{1/} AG - Areia grossa; ^{2/} AF - Areia fina; ^{3/} S/A - relação silte/argila; ^{4/} ADA - Argila Dispersa em Água;

^{5/} GF - Grau de Flocculação; ^{6/} CO - Carbono orgânico.

Quadro 5A. Atributos químicos utilizados na correlação linear simples de 52 perfis de solos da área de estudo para o horizonte B

Perfil	Classe	P ^{1/}	CTCr ^{2/}	K ^{+ 1/}	Ca ^{2+ 3/}	Mg ^{2+ 3/}	Al ^{3+ 3/}	H+AL ^{4/}	S ^{5/}	V ^{6/}	m ^{7/}	pH/H ₂ O ^{8/}	pH/KCl ^{8/}
		mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³				%			
1	LV	0,30	6,59	0,04	0,17	0,20	0,70	4,80	0,41	7,90	63,10	4,94	4,04
2	LV	0,40	3,92	0,04	0,18	0,13	0,61	2,90	0,35	10,80	63,60	5,14	4,29
3	LV	0,30	5,43	0,09	0,18	0,16	0,82	3,70	0,43	10,40	65,60	5,06	4,18
4	LV	0,30	7,29	0,01	0,19	0,09	1,95	5,40	0,29	5,10	87,05	4,79	4,03
5	LV	0,30	5,85	0,09	0,16	0,24	1,02	3,90	0,49	11,20	67,55	4,87	4,12
6	CX	0,10	6,49	0,00	0,19	0,02	0,75	3,10	0,21	6,30	78,10	5,48	4,08
7	CX	0,30	7,84	0,10	0,03	0,11	0,45	3,60	0,24	6,30	65,20	5,05	4,08
8	CX	0,30	9,25	0,02	0,17	0,04	0,55	3,10	0,23	6,90	70,50	5,30	4,07
9	CX	0,30	9,00	0,03	0,16	0,04	0,65	4,00	0,23	5,40	73,90	5,41	3,98
10	CX	0,40	6,20	0,04	0,18	0,05	1,23	3,70	0,27	6,80	82,00	4,96	4,07
11	CX	0,30	5,16	0,01	0,17	0,05	1,02	2,40	0,23	8,70	81,90	5,11	4,11
12	LVA	0,10	5,98	0,05	0,14	0,08	0,70	3,50	0,27	7,20	72,20	4,87	4,07
13	LVA	0,20	4,96	0,03	0,15	0,04	1,23	3,20	0,22	6,40	84,80	5,05	4,07
14	CX	0,10	10,90	0,02	0,18	0,14	0,98	3,80	0,35	8,40	73,70	4,80	3,80
15	CX	0,00	9,20	0,04	0,14	0,13	0,50	4,00	0,33	7,60	60,20	4,80	3,80
16	CX	0,00	7,20	0,02	0,14	0,14	0,50	4,00	0,32	7,40	61,00	4,80	3,90
17	CX	0,00	9,30	0,01	0,13	0,12	0,50	3,00	0,27	8,30	64,90	5,40	3,90
18	CX	0,10	10,90	0,07	0,19	0,11	0,60	3,20	0,39	10,90	60,60	5,40	4,00
19	CX	0,20	12,90	0,05	0,16	0,20	1,02	4,60	0,43	8,60	70,30	5,20	3,90
20	LV	0,00	8,30	0,17	0,14	0,25	0,65	5,70	0,57	9,10	53,30	5,10	3,80
21	LV	0,20	8,80	0,14	0,19	0,16	1,02	5,90	0,50	7,80	67,10	5,20	3,80
22	LV	0,10	7,30	0,04	0,17	0,18	0,60	4,50	0,40	8,20	60,00	4,80	3,90
23	LVA	0,10	5,30	0,06	0,19	0,13	1,40	3,00	0,38	11,20	78,70	5,00	4,30
24	LVA	0,10	5,70	0,08	0,18	0,14	0,20	3,00	0,41	12,00	32,80	5,30	4,10
25	LVA	0,10	5,90	0,02	0,14	0,14	0,10	3,50	0,31	8,20	24,40	5,30	4,20
26	LVA	0,00	7,60	0,14	0,16	0,12	0,40	4,90	0,42	7,90	48,80	4,90	4,00
27	CX	2,10	14,60	0,06	0,34	0,04	1,64	5,40	0,44	5,80	78,80	4,79	4,07
28	CX	1,60	14,85	0,04	0,24	0,02	2,87	4,60	0,30	6,10	90,50	4,88	4,21
29	CX	1,70	7,44	0,04	0,14	0,02	1,03	2,70	0,20	6,90	83,70	4,89	4,18
30	CX	1,80	12,18	0,07	0,14	0,02	2,15	4,40	0,23	5,00	90,30	4,79	3,91
31	CX	1,80	7,08	0,02	0,02	1,34	1,34	2,55	0,15	5,90	89,90	4,85	3,97
32	LV	1,40	7,09	0,05	0,22	0,02	1,33	4,60	0,29	5,90	82,10	4,95	3,64
33	LV	1,70	5,52	0,13	0,14	0,08	0,82	4,40	0,35	7,40	70,10	4,98	4,27
34	LV	1,40	6,44	0,01	0,12	0,05	0,82	5,10	0,18	3,40	82,00	4,78	4,29
35	LV	1,50	4,82	0,17	0,15	0,03	0,41	3,70	0,35	8,60	53,90	5,25	4,53
36	LV	1,40	5,95	0,03	0,14	0,05	1,23	4,90	0,22	4,30	84,80	5,02	4,41
37	LV	1,40	4,70	0,03	0,13	0,05	0,21	3,60	0,21	5,50	50,00	5,07	4,81
38	LV	1,90	12,02	0,07	0,12	0,06	2,67	6,60	0,25	3,60	91,40	4,81	3,96
39	LV	1,70	3,49	0,06	0,11	0,01	0,41	2,40	0,18	7,00	69,50	5,02	4,80
40	LV	1,70	6,58	0,03	0,12	0,03	0,41	3,90	0,18	4,40	69,50	4,93	4,39
41	LV	1,60	4,44	0,01	0,11	0,02	0,31	3,90	0,14	3,50	68,90	5,12	4,48
42	LVA	1,40	8,79	0,04	0,21	0,06	1,95	4,70	0,31	6,20	86,30	4,82	4,08
43	LVA	1,90	9,31	0,07	0,21	0,09	2,56	5,40	0,37	6,40	87,40	4,86	3,99
44	FX	1,60	15,46	0,04	0,27	0,05	5,44	8,30	0,36	4,20	93,80	4,71	3,79
45	GX	2,00	10,59	0,04	0,27	0,04	4,62	5,90	0,35	5,60	93,00	4,58	3,80
46	RL	2,10	23,73	0,10	3,50	2,72	0,00	0,80	6,32	88,80	0,00	6,03	4,58
47	RY	1,10	16,31	0,08	3,79	0,76	0,00	3,20	4,63	59,10	0,00	5,97	4,56
48	CXV	3,10	31,15	0,59	15,34	1,57	0,00	1,50	17,50	92,10	0,00	6,85	5,77
49	PV	1,70	9,87	0,08	1,06	0,28	0,92	4,70	1,42	23,20	39,30	5,16	4,18
50	LVA	1,70	8,22	0,07	0,13	0,03	1,95	4,70	0,23	4,70	89,40	4,92	4,11
51	CY	2,20	25,30	0,13	6,41	1,00	0,00	4,10	7,54	64,80	0,00	5,72	4,68
52	CY	0,50	17,43	0,15	1,81	1,26	0,60	4,10	3,22	44,00	15,70	5,29	3,99

^{1/} K, P - Extrator Mehlich ^{2/} CTCr – Capacidade de troca catiônica corrigida; ^{3/} Al, Ca, Mg, - Extrator: KCl 1 mol/L; ^{4/} H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; ^{5/} S - Soma de Bases Trocáveis; ^{6/} V - Índice de Saturação de Bases; ^{7/} m - Índice de Saturação de Alumínio; ^{8/}, pH em água e KCl - Relação 1:2,5.

Quadro 6A. Teor de K total, teores dos radionuclídeos e magnetometria utilizados na correlação linear simples de 52 perfis de solos da área de estudo para o horizonte

B

Perfil	Classe	Kt ^{1/}	K ^{2/}	eTh ^{2/}	eU ^{2/}	Mag ^{3/}	Ct ^{2/}	Th/K	Th/U	U/K
		dag kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		T				
1	LV	1,00	1,02	18,48	6,75	-27,66	11,69	20,82	0,37	7,46
2	LV	0,85	1,25	22,57	8,11	-24,89	13,69	20,93	0,36	7,10
3	LV	0,69	1,17	23,46	7,69	-31,18	13,19	21,42	0,34	7,17
4	LV	0,45	0,15	25,75	8,80	-35,43	13,24	200,04	0,36	70,80
5	LV	0,73	0,58	22,97	6,72	-34,03	11,86	37,34	0,30	14,41
6	CX	1,71	0,38	14,54	6,55	-25,67	9,09	27,08	0,44	13,03
7	CX	2,20	1,12	17,46	5,95	-26,09	11,14	20,27	0,36	7,87
8	CX	1,71	0,66	14,29	5,66	-26,90	9,04	17,99	0,40	7,57
9	CX	1,18	0,85	16,79	6,74	-26,17	11,10	23,13	0,40	9,04
10	CX	2,05	1,10	19,83	6,63	-28,10	11,90	23,62	0,35	8,55
11	CX	1,84	0,70	14,04	6,13	-27,96	8,31	18,49	0,41	7,55
12	LVA	0,71	0,86	20,22	6,58	-27,63	11,92	23,48	0,34	7,64
13	LVA	1,39	1,33	20,77	6,63	-28,36	12,54	21,04	0,32	6,68
14	CX	1,93	1,00	14,69	5,38	-25,95	9,37	16,95	0,37	5,95
15	CX	2,01	0,98	14,62	5,15	-59,60	9,72	15,02	0,38	5,50
16	CX	1,82	1,05	13,69	4,86	-98,75	9,10	15,19	0,34	5,11
17	CX	1,99	0,52	18,41	6,19	-24,16	10,39	51,09	0,36	16,37
18	CX	1,19	0,64	14,81	6,48	-15,09	9,98	22,69	0,43	10,72
19	CX	0,45	0,92	14,84	4,75	-22,37	9,41	20,44	0,34	6,24
20	LV	0,81	0,57	21,88	7,73	-28,25	11,79	30,64	0,36	11,48
21	LV	0,50	0,76	19,01	6,84	-19,85	11,11	24,87	0,37	9,33
22	LV	0,44	0,77	20,91	6,50	-9,72	11,71	21,59	0,33	6,90
23	LVA	1,76	1,00	14,54	5,26	-21,73	9,95	14,63	0,37	5,29
24	LVA	1,76	1,12	12,98	3,17	-31,57	8,28	14,90	0,31	4,40
25	LVA	1,03	0,99	19,47	6,57	-97,60	11,81	16,82	0,36	6,08
26	LVA	0,72	0,69	14,22	5,57	-36,62	9,27	22,61	0,34	7,28
27	CX	1,25	1,75	13,35	5,63	42,10	11,19	13,95	0,42	5,48
28	CX	1,14	0,85	12,20	6,07	30,43	9,08	16,42	0,47	6,98
29	CX	0,85	1,26	13,93	5,20	-81,96	9,28	12,17	0,38	5,12
30	CX	0,92	0,75	11,33	3,75	-38,25	7,39	16,38	0,37	5,85
31	CX	1,14	1,23	14,37	6,68	-5,18	10,90	12,18	0,45	5,80
32	LV	1,20	0,68	23,06	7,03	-34,22	12,20	69,50	0,32	20,43
33	LV	1,31	1,06	26,42	7,65	44,83	14,62	36,19	0,28	10,24
34	LV	1,09	0,05	29,46	9,15	48,85	13,90	295,37	0,31	92,20
35	LV	1,06	0,53	24,09	7,74	39,84	12,87	38,58	0,33	12,66
36	LV	0,42	1,07	20,14	6,58	-48,01	11,79	42,53	0,33	12,36
37	LV	1,20	0,94	10,71	5,52	-32,18	9,01	12,70	0,42	5,38
38	LV	1,09	0,01	29,55	9,77	-156,67	14,82	306,68	0,36	99,23
39	LV	0,98	0,67	24,84	7,65	47,31	13,50	59,97	0,30	15,55
40	LV	0,86	0,35	21,81	7,21	-4,59	11,38	57,10	0,35	23,89
41	LV	0,53	0,25	28,46	9,93	1,25	14,54	156,87	0,34	46,82
42	LVA	0,75	0,80	12,02	4,42	-35,97	8,11	15,73	0,39	5,78
43	LVA	1,03	1,24	12,26	4,13	-2,95	8,44	11,51	0,35	4,35
44	FX	0,44	0,04	20,37	6,73	-32,31	9,94	151,05	0,36	51,23
45	GX	0,47	0,93	13,35	5,96	-30,55	9,66	29,22	0,46	10,21
46	RL	1,76	1,37	11,67	3,40	-37,16	8,48	9,91	0,31	3,16
47	RY	0,93	1,24	12,26	4,13	-2,95	8,44	11,51	0,35	4,35
48	CXV	1,25	1,26	11,89	3,70	-16,57	8,11	10,34	0,34	3,49
49	PV	0,89	1,08	18,27	5,68	6,42	10,76	16,27	0,33	4,60
50	LVA	0,72	0,30	22,82	7,93	35,39	12,18	114,85	0,35	45,39
51	CY	1,59	1,04	9,47	3,02	-52,69	6,87	10,92	0,42	4,26
52	CY	0,32	0,69	17,35	4,54	-29,54	8,75	20,40	0,27	5,53

^{1/} Kt – Potássio total – EPA 3052; ^{2/}K, eTh, eU, Ct – gamaespectrometria; ^{3/}Mag – magnetometria.