



PREDIÇÃO DE UNIDADES DE MAPEAMENTO PEDOLÓGICO USANDO IMAGENS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS

Diego Fernandes Terra Machado ¹
Francisco Sergio Bernardes Ladeira ²

RESUMO

A complexidade na evolução de superfícies de aplainamento deixa ainda hoje lacunas para correta identificação, caracterização e espacialização de seus depósitos associados, dos solos e regolitos desenvolvidos nestas paleo-superfícies. O uso da aerogamaespectrometria integrada a SIGs, comumente utilizados em levantamentos geológicos, tem se mostrado eficaz no auxílio ao mapeamento do relevo, solos e regolitos. Na região da Serra da Canastra, à estas superfícies estão associados solos vermelhos com restos de duricrostas ferruginosas e ocasionalmente perfis lateríticos. Buscou-se neste trabalho identificar relações entre a variações nas concentrações dos rádio-elementos tório, urânio, e potássio, e características do relevo, com diferentes grupos de solos, para estimar sua probabilidade de ocorrência e distribuição espacial. Para tanto foi utilizado um método baysiano aplicando uma função de verossimilhança, tomando como variáveis predictoras, índices geomorfométricos e dados obtidos de levantamento aéreo de raios gama. A acurácia global das predições foi de 81% e o índice kappa de 0,68. Tório e Potássio apresentaram alto valor preditivo. Solos bem desenvolvidos ocorrem nos divisores, e apresentam valores elevados de Tório e muito baixos de Potássio, relação esta que se inverte para os solos pouco desenvolvidos. Na área de estudos, Plintossolos e duricrostas ferruginosas aparecem associados aos topos e bordas de platôs com altitudes próximas a 1200 m. O trabalho revelou que estes solos podem estar sub-representados, tanto do ponto de vista da distribuição espacial quanto da sua diversidade taxonômica em algumas das unidades de mapeamento dos mapas disponíveis para a área.

Palavras-chave: Aerogamaespectrometria; Morfometria, Solos, Relevo, Mapeamento.

ABSTRACT

The complexity in the evolution of planing surfaces leaves until today gaps in the correct identification, characterization and spatialization of their deposits, soils and associated regoliths developed in these paleo-surfaces. Aerogamaspectrometric data integrated with GIS, commonly used in geological surveys, has shown good results on relief, soils and regolith surveys. In the Serra da Canastra region, these surfaces are associated with red soils, remnants of ferruginous duricrusts and occasionally lateritic profiles. This work sought to identify relationships between variations in concentrations of radio elements thorium (eTh), uranium (eU), and potassium (K), and relief characteristics, with different groups of soil types, in order to estimate the probability of occurrence and its distribution. A bayesian method was used, applying a likelihood function, taking as predictor variables, morphometric indices and data obtained from aerial gamma-ray surveys. The overall accuracy of the predictions was 81% and the kappa index 0.68. eTh and K presented high predictive value. Well-developed soils occur in top-flat areas, presenting high values of eTh and very low values of K , wich is opposite for poorly developed soils. In the study area, Plinthosols and ferruginous duricrusts appear associated with the tops and edges of plateaus with altitudes close to 1200 m. The work revealed that these soils may be underrepresented, both from the point of view of spatial distribution and of their taxonomic diversity in some of the mapping units in the available surveys for the area.

Keywords: Aerogamaspectrometry; Morphometry, Soil, Relief, Mapping.

¹ Pós-Graduando do Curso de Geografia da Universidade Estadual de Campinas - SP, ftm.diego@yahoo.com.br;

² Professor do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências da Unicamp, ladeira@unicamp.br



INTRODUÇÃO

As superfícies de aplainamento podem ser entendidas como porções continentais de relevo plano a suave ondulado, que truncam indistintamente estruturas geológicas diversas (OLLIER, 1981). Comumente ocorrem associados a estas superfícies perfis de alteração e ocasionalmente depósitos nas áreas de topo (KING, 1956; CPRM, 2010). De acordo com Rosolen et al. (2017) ainda há incertezas quanto a evolução e formação de solos nestas superfícies antigas, questionando ainda a existência de tais depósitos, ou se seriam apenas produtos da intensa alteração de materiais *in situ*.

Tamanha complexidade envolvida na evolução destas paleo-superfícies se dá graças à variedade de materiais aos quais estão associadas e a sucessão de eventos paleoclimáticos (BUTT; LINTERN; ANAND, 2000). Os processos do intemperismo obliteram quaisquer estruturas sedimentares, dificultando a caracterização dos possíveis depósitos. O resultado é um regolito espesso, comumente laterítico que pode estar associado a formação de concreções ferruginosas, e que em determinados casos, sustentam amplos platôs, devido a maior resistência aos processos erosivos (LADEIRA, 2002).

Localizadas no centro-oeste do estado de Minas Gerais, as superfícies cimeiras (entre 1.000 e 1.500 m) das Serras e Patamares da Canastra estão relacionadas à Superfície Sul-Americana (KING, 1956; VALADÃO, 2009). É marcada pela alternância entre camadas de rochas predominantemente quartizíticas, filitos e mica-xistos, e coberturas detrito-lateríticas associadas a diferentes estágios de agradação e denudação (CORTES, 2015).

Os mapas geológicos disponíveis para a área (CPRM, 2010; CPRM; CODEMIG, 2014) trazem discrepâncias importantes no que diz respeito a ocorrência e distribuição das coberturas detrito-lateríticas. O mesmo ocorre para os levantamentos pedológicos que carecem de interpretações em escalas de maior detalhe, sobretudo para os solos desenvolvidos a partir de substratos ferruginosos/ferruginizados (RADAMBRASIL, 1983; UFV, 2010).

O uso de dados aerogamaespectrométricos, por vezes associados a informações geomorfométricas, integrados à Sistemas de Informação Geográficas e técnicas de mapeamento digital tem se mostrado promissoras, auxiliando no mapeamento do relevo (HERRERA et al., 2016), rochas (RIBEIRO; MANTOVANI; ABUD LOURO, 2013), solos e regolitos (MOONJUN et al., 2017; IZA; HORBE; SILVA, 2016). A aerogamaespectrometria é uma técnica que permite medir a concentração de potássio (K) e estimar as concentrações de urânio (eU) e tório (eTh) em rochas e solos em profundidade aproximada de 30 cm (DICKSON; SCOTT, 1997). Durante o intemperismo, estes radio-elementos podem ser lixiviados, se



acumular ou serem redistribuídos ao longo das superfícies, resultando em diferentes respostas espectrométricas que podem ser usadas como instrumentos de análise do meio físico.

No escopo da pesquisa, pretende-se mapear a distribuição geográfica da ocorrência das paleo-superfícies e caracterizar seus materiais associados. Para tal, áreas prioritárias para o detalhamento das investigações devem ser levantadas. Isto posto, buscou-se neste trabalho identificar as relações entre a distribuição espacial de diferentes grupos de solos, com a variação dos rádio-elementos tório (eTh), urânio (eU), e potássio (K), obtidos por levantamento aerogamaespectrométrico e características do relevo, a fim de identificar áreas de probabilidade de ocorrência desses grupos.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos (AE) está situada na região da Serra da Canastra, um mosaico paisagístico com forte controle estrutural inserida no contexto da Faixa Brasília, sistema orogênico Neoproterozóico situado entre os crátons Amazônico e São Francisco. De acordo com Ross (2006) faz parte de um conjunto de planaltos e serras residuais de Minas-Goiás, cujo alinhamento de cristas é sustentado por rochas metamórficas associadas à Faixa Brasília.

De acordo com o IBGE (2019), são identificadas três Unidades Geomorfológicas, a saber: no limite oeste da área de estudos estão os Patamares Cuestiformes Orientais da Bacia do Paraná, caracterizado por relevo plano ou dissecado com interflúvios tabulares e amplos interflúvios convexizados, onde ocorrem rochas sedimentares do Mesozoico intercaladas por derrames basálticos do juracretáceo (Formações Marília, Botucatu e Serra Geral). Em contato imediato com estas unidades, ocupando a porção centro-leste da AE, encontra-se a Serra da Canastra, cujo relevo é fortemente controlado por falhas e lineamentos estruturais. Predominam rochas do Grupo Canastra - Formação Chapada dos Pilões que consiste de intercalações de quartzitos puros a micáceos e filito (CPRM; CODEMIG, 2014). Já a unidade Patamares de Canastra, porção norte da AE, apresenta-se como uma área em níveis topográficos mais baixos que a Serra da Canastra onde são encontradas rochas do Grupo Canastra - Formação Paracatu, sendo estas filito sericítico e muscovita-clorita-quartzo xisto, predominantes.

Nos topos da chapadas e serras há um antigo pediplano reafeiçoado onde ocorrem solos vermelhos com restos de couraças ferruginosas, heranças da superfície de aplanamento que truncou os topos destas estruturas (RADAMBRASIL, 1983), que para Saadi (1991), correlaciona-se à Superfície Sul-Americana, que após a sedimentação Cretácea, desenvolveu-se uma extensa superfície de erosão (Paleógena).

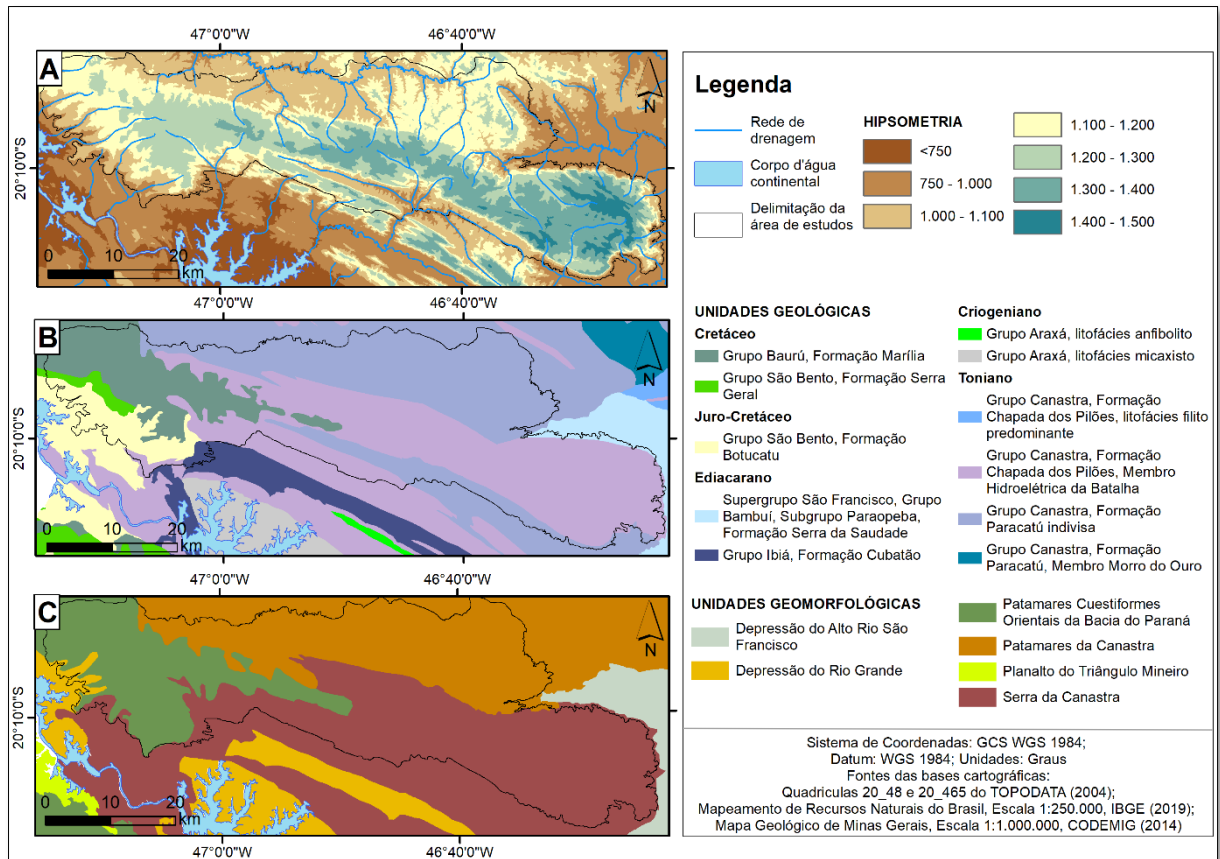


Figura 1: Mapa Hipsométrico (A); de Unidades Geológicas (B); e de Unidades Geomorfológicas (C)

METODOLOGIA

Trabalho de campo e aquisição de informações sobre solos

Um trabalho de campo foi realizado na área de estudos, percorrendo mais de 270 km em uma área correspondente a 1640 km² para levantamento de dados e coordenadas. Foram realizados 42 pontos para identificação expedita dos materiais superficiais, considerando os parâmetros estabelecidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018) e mais 157 pontos controle ao longo do percurso, observando os materiais superficiais, afloramentos rochosos e zonas de transição. Estes foram agrupados conforme:

- Solos bem desenvolvidos (SBD): aqueles que apresentavam maior grau de desenvolvimento de estrutura pedogenética e espessura suficiente para não serem enquadrados como CAMBISSOLO ou NEOSSOLO;
- Solos pouco desenvolvidos (SPD): solos rasos, pedregosos, pouco espessos e com baixo grau de desenvolvimento pedogenético, associados a afloramentos rochosos ou não;
- Solos plínticos (SP): solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte plíntico, litoplíntico ou concrecionário.



Parâmetros morfométricos e morfográficos

O entendimento sobre as relações solo-relevo tem papel destacado na compreensão dos padrões de distribuição espacial dos solos. Uma vez que o relevo é variável chave para a identificação de ocorrência dos solos na paisagem, sobretudo em escalas de maior detalhe cartográfico, os parâmetros geomorfométricos assim como interpretações sobre os aspectos morfoesculturais do relevo (ROSS, 1992) podem desempenhar papel de destaque.

Aquisição de dados

Um modelo numérico de elevação com resolução espacial de 30 m foi obtido através do portal TOPODATA, correspondentes as quadrículas 20_48 e 20_465 (VALERIANO, 2004). O sistema de medidas foi convertido de arcos de segundos para metros e o sistema de coordenadas definido como WGS84 UTM, Zona 23S. A partir deste modelo foram extraídos valores de altitude (m), declividade (%) e a rede de drenagem em ambiente SIG (ArcGIS, v. 10.8).

Dissecação do relevo e densidade de drenagem

A análise dos Padrões de Formas Semelhantes, como proposto por Ross (1992), leva em consideração a distância interfluvial e o grau de aprofundamento dos vales, correspondendo respectivamente a Densidade de drenagem (DD) e o Índice de Concentração da Rugosidade (ICR), conforme as adaptações sugeridas por Nazar e Rodrigues (2019).

A DD representa a concentração de feições circundantes em relação a um ponto de referência, sendo inversamente proporcional a distância interfluvial, e descreve o grau de dissecação topográfica. Já o ICR indica o padrão espacial dos valores de declividade por unidade de área, e retrata o grau de aprofundamento dos vales (SAMPAIO; AUGUSTIM, 2014)

Os índices foram calculados utilizando um Estimador de Densidade de Kernel, a partir da ferramenta *Kernel Density* (Arcmap/ArcGIS, v. 10.8). Trata-se de um método estatístico de estimação não paramétrico de curvas de densidade, cujas observações são ponderadas pela distância em relação a um valor central. Para o raio de abrangência estabeleceu-se o valor de 564m, conforme sugerido por Sampaio e Augustim (2014). Após obtenção dos valores de densidade, estes foram reclassificados, em uma escala numérica variando entre 1 e 5 (1 *muito baixo*; 2 *baixo*; 3 *médio*; 4 *alto*; 5 *muito alto*) utilizando o método do Quantil.

Esboço do mapa dos padrões de formas do relevo

Os padrões de formas do relevo foram definidos de acordo com Nazar e Rodrigues (2019) considerando o grau de dissecação topográfica. Adotar uma proposta geomorfométrica



para a identificação dos padrões das formas do relevo visa minimizar os efeitos da abstração inerente aos procedimentos tradicionais de mapeamento (NAZAR; RODRIGUES. 2019).

Para esta etapa, os arquivos *raster* reclassificados dos índices DD e ICR, foram vetorizados e sobrepostos, utilizando a ferramenta *Union (Arcmap)*. Gerou-se, um novo arquivo vetorial (DD_ICR) cujos polígonos correspondem as interseções entre as classes das variáveis. Por fim, as unidades de mapeamento dos padrões do relevo foram delineadas utilizando a ferramenta Calculadora de Campo. Para tal, foi aplicada a seguinte lógica, adaptada de Nazar e Rodrigues (2019), apresentada no quadro 1:

Quadro 1: Lógica empregada na determinação das classes dos padrões de relevo

Se o produto de $DD \times DT = 1$ ENTÃO Topos Planos
Se o produto de $DD \times DT = 2,3,4$ ENTÃO Colinas Suaves
Se o produto de $DD \times DT = 6,8,9,12$ ENTÃO Colinas Onduladas
Se o produto de $DD \times DT = 10,15,16$ ENTÃO Colinas Fortemente Onduladas
Se o produto de $DD \times DT = 20,25$ ENTÃO Relevo Montanhoso
Se o produto de $DD(1) \times DT(5) = 5$ ENTÃO Relevo Escarpado
Se o produto de $DD(5) \times DT(1) = 5$ ENTÃO Fundos de Vale

Para a determinação das classes de padrões do relevo, utilizou-se para cada combinação das intersecções de DD e ICR, a seguinte expressão:

if [DD]= "2" and [ICR]= "3" then [relevo] = "Colinas Onduladas" end if

onde: DD [2] = densidade de drenagem baixa; ICR [3] = índice de concentração da rugosidade médio; assim $[DD] 2 \times 3 [ICR] = 6$ (então: Colinas Onduladas).

Levantamento aerogeofísico e análise dos dados aerogamaespectrométricos

Os dados do Levantamento Aerogeofísico do Estado de Minas Gerais (área 7) foram concedidos pela CODEMIG (2006), e encontram-se na escala de 1:100.000, com resolução espacial de 100 m. Foram utilizados os produtos derivados dos canais do *eU* (ppm), *eTh* (ppm), e *K* (%). As imagens foram convertidas do formato GRID – Geosoft para formato TIF e o sistema de coordenadas definido como WGS84. A partir das coordenadas obtidas em campo, extraiu-se os valores dos rádio-elementos em ambiente SIG para definir a assinatura dos rádio-elementos para cada grupo de solos. Uma vez que os dados não apresentaram distribuição normal, utilizou-se uma análise estatística descritiva não paramétrica por meio de *boxplot*. Esse recurso permite identificar valores de tendência central (mediana), dispersão (quartis 25% e 75%), simetria dos dados e *outliers*. Para tal, utilizou-se o *software* Microsoft Excel.



Estratégia para predição das unidades de mapeamento de solos e validação dos resultados

A fim de mapear a variabilidade espacial dos diferentes grupos de solos (SBD, SPD e SP), utilizou-se um método bayesiano aplicando uma função de verossimilhança para estimar a probabilidade de ocorrência para estes grupos. Para tanto, a ferramenta *Class Probability* (*ArcMap v. 10.8*) foi selecionada. O resultado é um arquivo *raster* multibanda cujas bandas armazenam a probabilidade de cada célula pertencer a uma determinada classe, dentre as estabelecidas nos dados de entrada (*input data*). O treinamento do modelo consiste na criação de um arquivo de assinatura para as classes definidas pelas observações de campo e suas respectivas coordenadas (dados de treinamento) e um conjunto de variáveis preditoras, neste caso *eTh*, *eU*, *K*, *ICR* e *DD* (formato *raster*).

O conjunto de dados para validação das predições foi composto por 32 observações oriundas de dados legados de solos (EMBRAPA, 2010 e RADAMBRASIL, 1983) e observações de campo. Faz-se importante a utilização de conjuntos distintos para treinamento do modelo e validação afim de evitar viés otimista (HAMMOND; VERBYLA, 1996). Para avaliação das predições, empregou-se os índices de acurácia global e *kappa*.

APORTE TEÓRICO

A caracterização e espacialização dos solos e depósitos associados às paleo-superfícies correlatas à Superfície Sul Americana (VALADÃO, 2009) ainda carecem de maior detalhamento (ROSOLEN et al., 2017). Vasconcelos (2011) contribuiu na identificação de processos de evolução lateral dos solos na superfície cimeira do chapadão do Zagaia. Cortes (2015) e Nazar (2018) identificaram correlações entre a ocorrência de diferentes tipos geocoberturas e variações nos rádio-elementos *eTh*, *eU* e *K* na superfície cimeira da Serra da Canastra (SC). Todavia, ainda há incertezas quanto as características e distribuição de materiais ferruginosos/ferruginizados na região, assim como dos solos associados a estes materiais e a possíveis depósitos terciários, relacionados as paleo-superfícies. Tais questões são evidenciadas pelas diferenças encontradas nas representações cartográficas, sobretudo nos mapas geológicos (CPRM, 2010; CPRM; CODEMIG, 2014) que divergem quanto a ocorrência e distribuição dos materiais detrito-lateríticos ferruginosos, e nos mapas pedológicos (RADAMBRASIL, 1983; UFV, 2010) os quais há indícios de sub-representação espacial e taxonômica de solos derivados destes materiais. Vale ressaltar que estas questões estão diretamente relacionadas com as escalas de representação cartográfica, visto que a área, assim como parte do território nacional, ainda carecem de levantamentos mais detalhados.



A utilização de procedimentos digitais de mapeamento de solos (McBATNEY; MENDONÇA-SANTOS; MINASNY, 2003) e geomorfométricos (WEISS, 2001) tem sido empregadas com sucesso para a caracterização espacial do meio físico. Índices como DD e ICR permitem a incorporação do relevo como variável numérica nos processos de modelagem. O ICR possibilita identificar unidades homogêneas de relevo, no que se refere à dissecação, divergindo da análise pontual (pixel-a-pixel) ao considerar o padrão de distribuição dos valores de declividade por unidade de área (rugosidade do relevo) (SAMPAIO; AUGUSTIM, 2014).

A região da Serra da Canastra apresenta estreita relação entre substrato-rochoso e topografia, conseqüentemente refletindo sobre as propriedades dos solos resultantes dessa interação (MAURO; VALADÃO, 2018). Enquanto as variáveis morfométricas como ICR e DD fornecem informações valiosas sobre as características do relevo, a aerogamaespectrometria pode contribuir para informações dos substratos rochosos e depósitos associados (RIBEIRO; MANTOVANI; ABUD LOURO, 2013).

Os levantamentos aéreos de raios gama envolvem a medição da radiação gama, permitindo inferir sobre a variação geoquímica de K, U e Th nos 30 cm superiores da superfície terrestre. Alterações nestes radio-elementos no solo e rocha expostos podem indicar mudanças entre grandes unidades litológicas, ou mesmo dentro das próprias unidades, devido ao intemperismo e outros efeitos do regolito (DICKSON e SCOTT 1997). Ainda segundo os autores, materiais relacionados com regolitos (ex. calcrete, ferricrete) apresentam assinaturas radiométricas próprias. Dickson e Scott (1997) sugeriram que áreas com duricrostas ferruginosas, tendem a ter baixos teores de K (0,4%) e relativamente altos teores de Th (24 ppm) e U (2,7 ppm). Além disso duricrostas concentram Th e, em menor grau, U, em relação às rochas subjacentes, isso por que, sobretudo em ambientes húmidos com boa circulação de água, o K tende a ser mais lixiviado comparativamente ao Th e U (CARRIER et al., 2006).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Características dos materiais pedológicos.

A região dos Patamares e Serras da Canastra apresentam diversas pedo-paisagens, abrangendo desde solos muito intemperizados e bem desenvolvidos, comumente ocupados por culturas anuais e perenes, até solos menos evoluídos, estes associados a pastagens e campos rupestres. Solos hidromórficos ocorrem nas depressões, sobretudo nas chapadas.

De acordo com a literatura, dentre os aqui designados como SBD há predomínio de LATOSSOLO VERMELHO (distroféricos, distróficos e/ou ácidos) e VERMELHO-



AMARELO (distróficos e/ou ácricos), com textura variando de média a muito argilosa. Com distribuição espacial mais restrita, ocorrem Nitossolos (Figura 2), sendo que esta última ordem foi identificada durante as etapas de campo, mas não consta nas legendas dos mapas e levantamentos dos dados legados de solos (UFV, 2010; RADAMBRASIL, 1983).

No grupo dos SPD há predomínio de CAMBISSOLO HÁPLICO e NEOSSOLO LITÓLICO, ambos distróficos e frequentemente ocorrem associados na paisagem (UFV, 2010; RADAMBRASIL, 1983). Por sua vez, os SP se restringem na literatura a PLINTOSSOLO ARGILÚVICO distrófico de textura média/argilosa (UFV, 2010), todavia, o trabalho de campo revelou que este grupo pode estar sub-representado, tanto do ponto de vista da distribuição espacial quanto da sua diversidade taxonômica, questões que serão tratadas adiante.

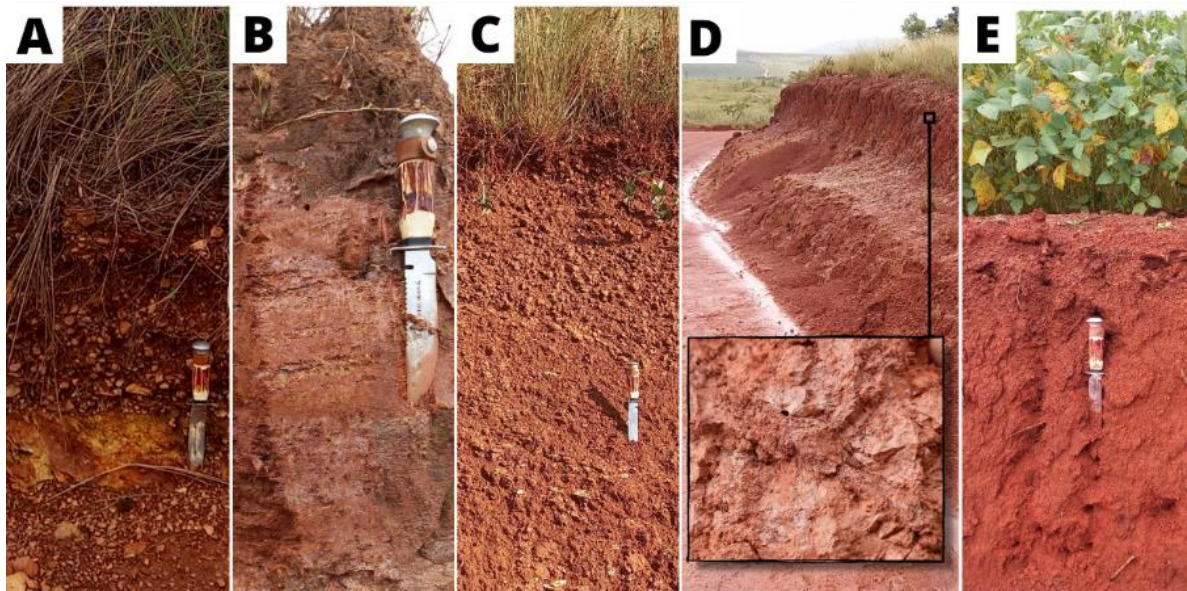


Figura 2: Principais tipos de solos identificadas na área de estudos – Neossolo (A); Cambissolo (B); Plintossolo (C); Nitossolo, com destaque para a ceroseidade e a “saia do barranco”; e Latossolo (D)

Caracterização dos parâmetros morfométricos e morfográficos

Na região dos Patamares e Serras da Canastra os processos de dissecação da paisagem assumem importância pois nota-se que o padrão das formas de relevo, além da forte influência estrutural, reflete características diretamente relacionadas a ciclos de erosão que atuaram na esculturação da paisagem sobre substratos com diferentes níveis de resistência.

A variação altimétrica para a área percorrida compreende o intervalo de 965 a 1496 m, cuja amplitude corresponde à 531 m. Uma vez que há interesse em identificar os materiais das superfícies cimeiras na área de estudos, definiu-se como limite altimétrico principal a cota de



1080 m, que marca o limite de altitude no qual se iniciam as escarpas que circundam a proeminente serra quartzítica do Planalto do Diamante.

O ICR, parâmetro que indica a densidade da declividade conforme Sampaio e Augustin (2014) nos permite inferir sobre a rugosidade do terreno. Quanto maiores os valores, maior a concentração superfícies declivosas por unidade de área (Figura 3A). O compartimento dos Patamares da Canastra apresenta maior rugosidade, com ICR entre médio e alto. Já os compartimentos da Serra da Canastra, e Chapadas da bacia do Paraná, há predomínio de valores baixos e muito baixos correspondendo as superfícies aplainadas.

A DD também permite inferir sobre os graus de dissecação topográfica a partir da distância interfluvial (Figura 3B). Valores baixos indicam relevos suaves, particularmente importantes para identificar superfícies planas e áreas de topo entre áreas onde aparecem vertentes com graus de dissecação mais pronunciados (NAZAR; RODRIGUES, 2019).

Os índices ICR e DD foram categorizados em cinco classes (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta) o que permitiu a identificação de padrões de relevo em função dos níveis de dissecação (Figura 3C). Cerca de 10% da área correspondem a relevos aplainados associados a interflúvios, 22% são vertentes suavemente dissecadas associadas a colinas suaves, 34% referem-se a relevo dissecado associado a colinas onduladas, 29% a relevo fortemente dissecado associado a colinas fortemente onduladas e fundos de vale, e 4% são relevos montanhosos ou escarpados, classe esta que pode estar subestimada devido a limitações dos procedimentos adotados e que também foram observados por Nazar (2018).

As classes de ICR e DD muito baixas e baixas estão associadas aos relevos menos dissecados, que marcam as amplas chapadas (Figura 3D) na porção oeste da área de estudos, e se estendem, em menor extensão até a porção leste (Planalto do Diamante). No compartimento dos Patamares da Canastra, estas superfícies são muito restritas, e geralmente estão associadas a solos bem desenvolvidos nos divisores relativamente amplos (Figura 3E). Solos Plínticos e eventualmente, perfis de alteração, são identificados nos divisores mais estreitos. Estas áreas são utilizadas para cultivo de culturas anuais e exploradas para extração de cascalho para pavimentação das estradas locais. Geralmente apresentam-se como topos de *morrotes* concordantes entre as cotas de 1200 – 1260 m de altitude, mantidos por materiais de maior resistência erosiva (Figura 3F).

Os padrões dissecados, associados a colinas onduladas ocorrem em locais com média densidade de drenagem e aumento da declividade em relação às áreas adjacentes mais suavizadas. A estes estão associados os solos pouco desenvolvidos (Cambissolos e Neossolos) e são comumente recobertos por campos ou pastagens (Figura 3G).

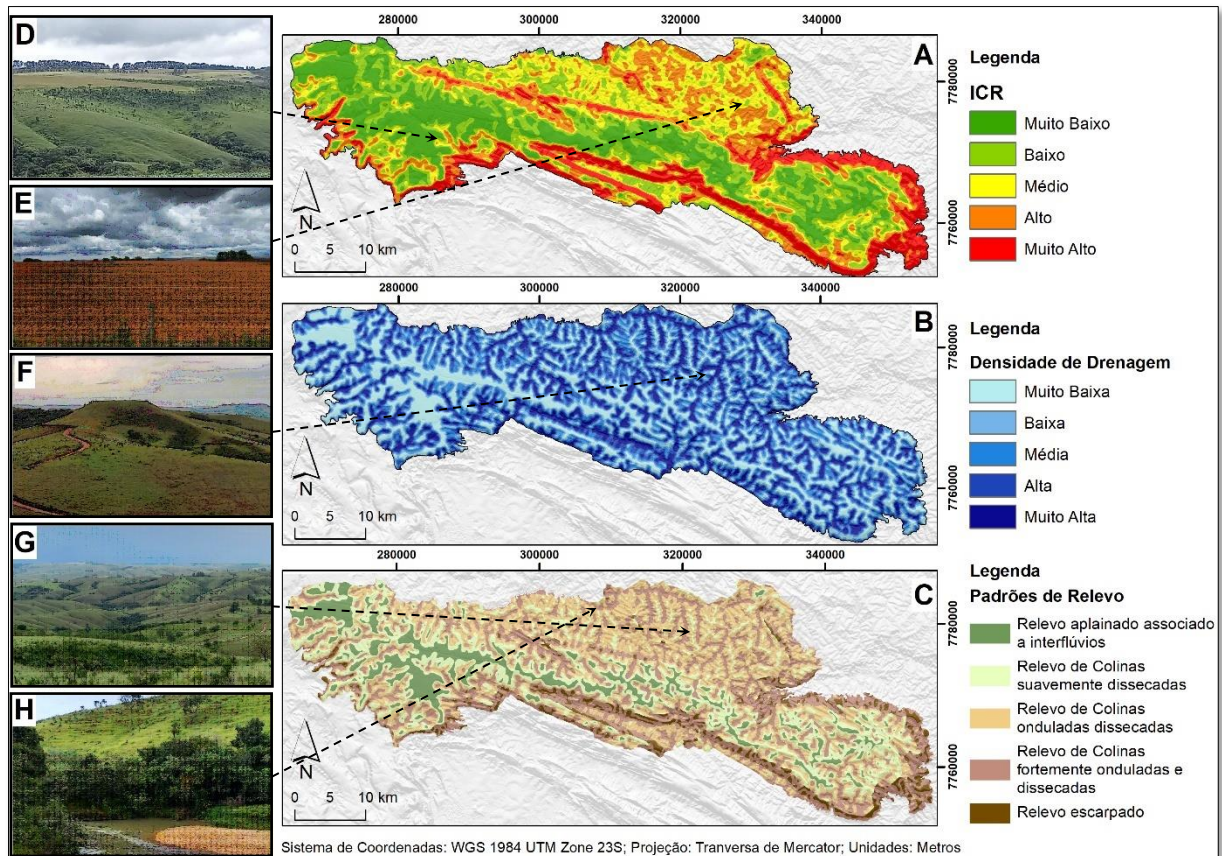


Figura 3: Mapas do Índice de Concentração da Rugosidade (A); Densidade de Drenagem (B); Representação dos Padrões de Relevo (C); e algumas feições representativas das áreas aplainadas de topo das chapadas (D); dos Interflúvios amplos no domínio dos relevos de Colinas onduladas dissecadas (E); dos *Morrotes* com topos concordantes ferruginosos (F); dos relevos de colinas onduladas dissecadas e fortemente onduladas associadas a quartzitos (G); e dos relevos fortemente ondulados e fortemente dissecados associados a rede de drenagem (H).

Os padrões mais dissecados relacionam-se aos principais canais de drenagem ou a lineamentos estruturais. No chapadão do Zagaia, o córrego do Buracão expõe os basaltos da Formação Serra Geral. Na porção mais a norte, nos Patamares da Canastra, o Rio Araguari representa a principal drenagem (Figura 3H), e é responsável pela intensa dissecação do relevo neste compartimento. No Chapadão do Diamante destaca-se o vale do Rio São Francisco. Nas áreas onde predominam estes padrões de relevo, é comum a ocorrência de solos rasos, associados ou não a afloramentos rochosos.

Análise dos dados aerogamaespectrométricos

Na figura 4, pode-se observar que, de modo geral, as maiores diferenças entre as medianas e as distribuições dos quartis para os três grupos de cobertura pedológica (SBD, SPD, SP) são mais evidentes para o radioelemento eTh sugerindo que este apresenta maior potencial para individualização das classes referidas (BROWN; McDANIEL; GESSLER, 2012).



As variáveis K e eU por sua vez, apresentam maior sobreposição entre os quartis, embora os valores de tendência central estejam consideravelmente separados. Grande parte desta sobreposição dá-se para o grupo dos SP, cujos valores tendem a ser intermediários e sobrepor-se de modo mais pronunciado entre os demais.

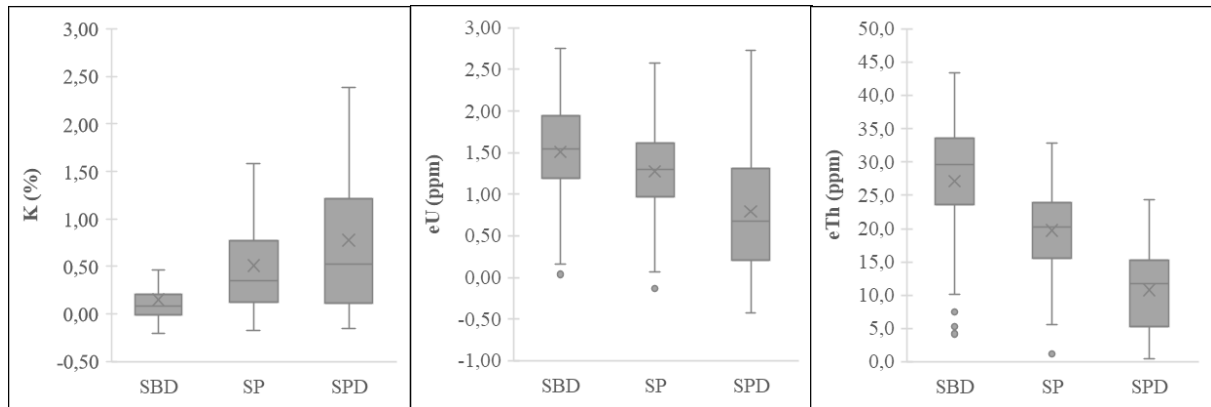


Figura 4: *Box-plots* dos dados aerogamaespectrométricos extraídos dos canais do Potássio (K), Urânio (eU) e Tório (eTh). SBD – solo bem desenvolvido; SP – solo plânticos; SPD – solo pouco desenvolvido.

Tório (eTh)

O elemento eTh apresentou alto potencial preditivo para os três grupos de coberturas pedológicas. As concentrações médias foram de 27, 19 e 10 ppm para SBD, SP e SPD respectivamente. Alguns aspectos podem ser levados em consideração, como diferenças texturais e composição mineralógica. A textura do solo frequentemente mostra uma correlação confiável com a radiação gama do solo (REINHARDT; HERMANN 2018). De acordo com Dickson e Scott (1997), conforme avanço do intemperismo, o Th liberado tende a ser rapidamente adsorvido em minerais de argila e coprecipitados em óxidos de ferro nos solos. Reinhardt e Hermman (2018) identificaram que até um terço do Tório presente nos solos podem estar retidos nos óxidos e nas frações silte e argila. Os autores destacam ainda que, eTh apresentou elevado valor preditivo para a fração argila.

Na região do Planalto do Diamante, Nazar (2018) verificou forte relação entre altos valores de eTh e baixos de K nas superfícies aplainadas de topo. O mesmo comportamento foi observado para as áreas de topo ao longo do Chapadão da Zagaia adentrando aos Patamares da Bacia do Paraná, locais onde predominam solos argilosos ou muito argilosos e oxídicos.

O aumento da concentração de Tório nos solos devido ao intemperismo se dá por acumulação relativa, ou seja, dada sua baixa mobilidade, este elemento tende a permanecer no perfil, principalmente associado às frações coloidais, enquanto outros mais móveis são lixiviados. Nesse sentido, os SPD, sobretudo aqueles desenvolvidos a partir dos quartzitos que



predominam na área de estudos tendem a apresentar valores inferiores de Th, relativamente aos SBD e SP (Figura 5A). O contrário ocorre para o potássio.

Potássio (K)

A amplitude nos valores de K (0,0 - 2,38 %) para os SPD pode estar relacionada às diferentes litologias que ocorrem na região. Dentre as rochas da área, filitos e xistos são as que apresentam maior teor de K. Onde predominam muscovita-xistos, há uma resposta maior na faixa do potássio. Nos locais onde prevalecem materiais derivados de quartzito puro, os valores são baixos ou nulos para todos os radioelementos.

Na porção central do Planalto do Diamante há um pequeno aumento no sinal do K em relação as áreas circundantes (Figura 5C). De acordo com Dickson e Scott (1997) pequenas variações na resposta de raios gama dentro das unidades podem ocorrer devido a leves mudanças litológicas, intemperismo e outros efeitos relacionados ao regolito (DICKSON; SCOTT, 1997). A área em questão compreende rochas do Grupo Canastra, Formação Chapada dos Pilões, compostas por Quartzitos puros a micáceos e Filitos, sendo assim, essa diferença pode ser indicativa de variações locais do substrato rochoso. No limite oeste da área de estudo, área dos Patamares da Bacia do Paraná, também ocorrem variações desta natureza. Neste caso podem estar relacionadas a afloramentos nas bordas da chapada e incisões mais profundas da rede de drenagem, contrastando com as chapadas, cujos valores são muito baixos (0,0 - 0,2%).

Considerando o contexto de evolução da área onde estão justapostos solos maduros e solos menos desenvolvidos, as variações no canal do K podem contribuir para separação destes grupos. Durante o intemperismo em um ambiente de lixiviação, as frações K móveis diminuem ao longo do tempo em relação a Th e U, confirmado por um estudo de Carrier et al. 2006. Os valores de K tendem a ser mais elevados nas áreas das cristas alongadas, com forte controle estrutural, e nas unidades de relevo dissecado associado a colinas onduladas e fortemente onduladas, áreas onde predominam SPD.

Urânio (eU)

O eU apresentou um padrão de distribuição espacial semelhante ao do eTh, porém, com maiores variações na intensidade do sinal para uma mesma área, comparativamente, conferindo a este elemento menor poder preditivo, visto que há maior sobreposição das concentrações entre os três grupos de solos. Uma possibilidade para essa maior variação relativa pode ser atribuída a maior mobilidade do urânio. De acordo com Boyle (1982) durante o desenvolvimento dos solos, quantidades consideráveis de urânio são lixiviadas pelo intemperismo, quando



comparadas ao tório. Todavia o comportamento do U ainda não é bem conhecido (HERRMANN et al., 2010). Soma-se a isso potenciais erros de estimação do eU pela interferência de gás radônio, que pode escapar da rocha e do solo durante o decaimento do nuclídeo ^{214}Bi , utilizado para obter-se as concentrações de Urânio (HERRMANN et al., 2010; DICKSON; SCOTT, 1997).

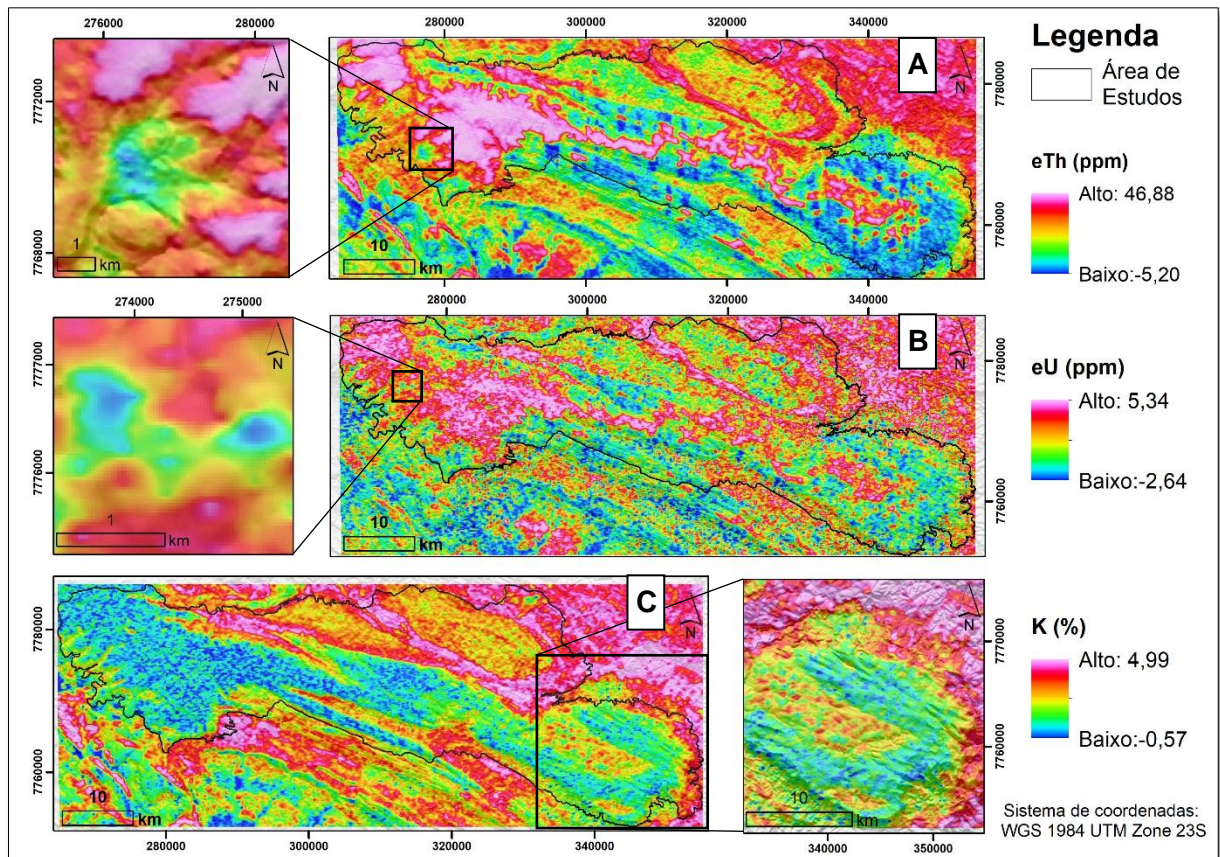


Figura 5: Mapas dos radioelementos na região da Serra da Canastra – MG: (A) eTh, com destaque para o contato entre a chapada onde ocorrem solos bastante intemperizados (rosa) e as vertentes dissecadas associadas a solos jovens, desenvolvidos sobre quartzítos (verde/azul); (B) concentração de eU, com destaque para áreas com contraste textural, onde solos com textura média apresentam valores relativamente menores de eU em comparação aos solos mais argilosos; e (C) %K, com destaque para a área do Chapadão do Diamante.

Apesar de seu menor valor preditivo, o eU pode contribuir para identificar algumas feições/variações locais. No limite oeste da área de estudos, Cortes (2015) identificou aumento do sinal para a faixa do urânio nas bordas das chapadas, relacionado à presença dos basaltos, e a patamares concrecionários rebaixados. Basaltos apresentam incremento de U e Th durante o intemperismo (GONÇALVES; SAMPAIO, 2013). Ainda na mesma região, o eU parece responder a variações da textura dos solos. Assim como o Th, o U tende a ser adsorvido pelas argilas e óxidos. Observou-se durante as atividades de campo, manchas de solos com textura



média circundados por solos mais argilosos, de modo que os primeiros apresentam valores mais baixos de urânio ($\pm 0,03$ ppm), apresentando-se como manchas/ilhas, circundados por áreas com valores mais elevados ($\pm 1,2$ ppm) e que estão relacionados com o segundo (Figura 5B). Mais estudos precisam ser conduzidos visando melhor compreender tais padrões de distribuição.

Predição das unidades de mapeamento e sua validação

A partir da revisão bibliográfica e da análise exploratória dos dados definiu-se um conjunto de variáveis com potencial para inferir sobre a distribuição espacial de tipos de solos na área de estudos. Utilizando um método bayesiano aplicando uma função de verossimilhança, obteve-se a probabilidade de ocorrência para os grupos de solos, conforme figura 6.

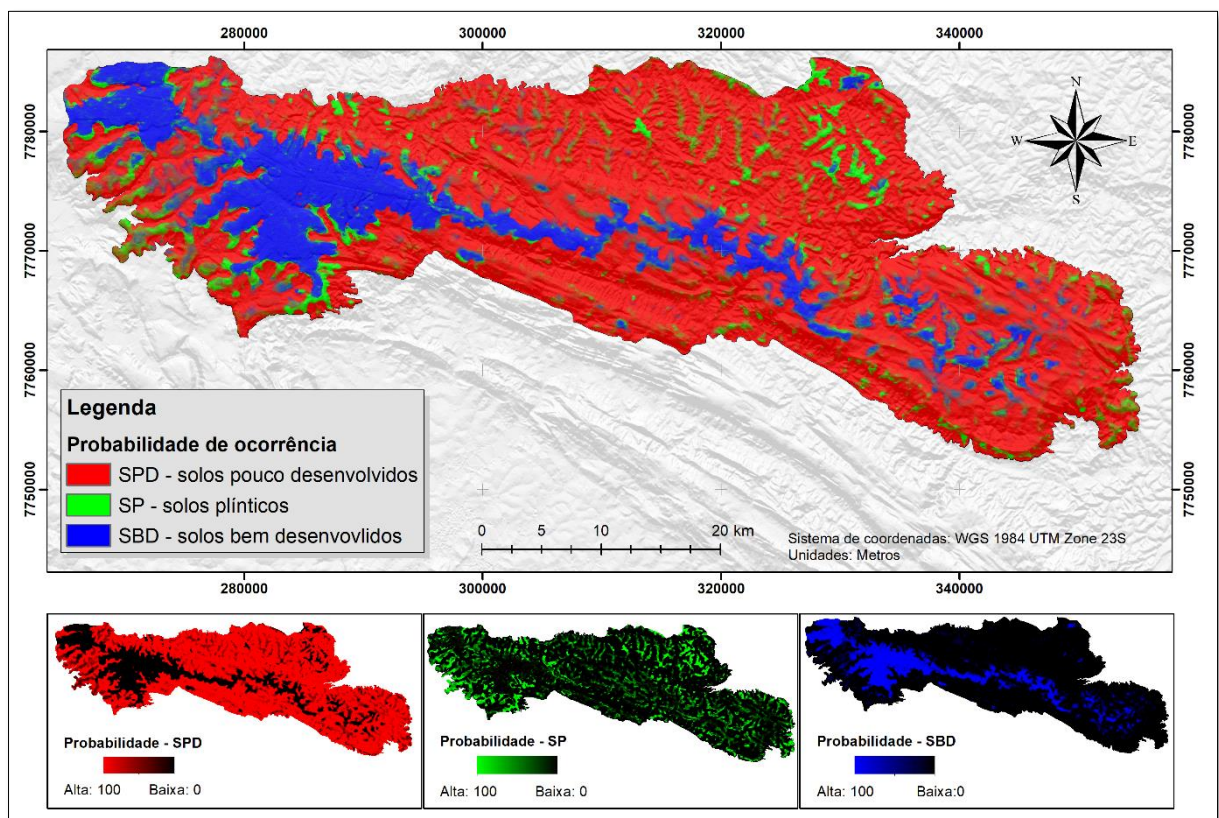


Figura 6; Mapa da probabilidade de ocorrência e distribuição espacial dos grupos de solos: SPD – Vermelho; SP – Verde; SBD – Azul.

Para a validação, atribuiu-se para cada pixel uma classe em função do maior valor de probabilidade predito. Das 32 amostras de confirmação, 26 (81%) foram classificadas corretamente, resultando em um índice *Kappa* de 0,68, considerado como substancial de acordo com Landis e Koch (1977). A matriz de confusão está apresentada na tabela 1.



Tabela 1. Matriz de confusão baseada em 32 observações

Predição	Observações			Acurácia do usuário
	SPD	SL	SBD	
SPD	11	0	3	79%
SP	0	4	0	100%
SBD	3	0	11	79%
Acurácia do produtor	79%	100%	79%	

*SPD – solo pouco desenvolvido; SP – solo plínticos; SBD – solo bem desenvolvido

Uma das principais causas de erro na classificação se deu em áreas planas, no Chapadão do Zagaia, onde ocorrem sequências entre Latossolo-Cambissolo associadas a feições concavas-retilíneas. De acordo com Vasconcelos et al. (2013) há indícios de que solos mais desenvolvidos que ocorrem entre as porções retilíneas e côncavas no Chapadão do Zagaia, estão sendo ‘rejuvenescidos’ devido a processos de abatimento do relevo.

Os maiores valores de incerteza de predição (quando um pixel recebe probabilidade semelhante para duas ou mais classes) foram observados para os Solos Plínticos. Uma explicação para tal, seria o fato de que estes solos com presença de materiais ferruginizados encontram-se frequentemente associados a transições entre superfícies de maior declividade (domínio dos solos pouco desenvolvidos) e as áreas de topo, onde ocorrem os solos mais bem desenvolvidos. Muitas vezes, marcam rupturas de declive, sobretudo nas bordas das chapadas.

A integração dos dados aerogamaespectrométricos e índices de dissecação permitiu a ampliação do conhecimento acerca dos padrões de ocorrência e distribuição dos tipos de cobertura pedológicas na área de estudos, sobretudo dos materiais ferruginizados (SP), classe com maior carência de informações nos materiais cartográficos consultados.

Os mapas do levantamento de recursos naturais – folhas SF. 23/24 (RADAMBRASIL, 1983) e levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região do Alto Paranaíba (MOTTA et al., 2004) não relatam a ocorrência de Plintossolos ou solos com caráter plíntico nas unidades de mapeamento compreendidas nos limites da área de estudos. Já o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais - escala 1:650.000 (UFV, 2010) descrevem a ocorrência de PLINTOSSOLO ARGILÚVICO distrófico típico cuja área de ocorrência é restrita a superfície cimeira do Planalto de Diamante. Além disso parece haver maior diversidade taxonômica, uma vez que também foram identificados em campo perfis com horizontes concrecinários e litoplínticos, com espessuras variadas, sobre diferentes tipos de substratos.

A ocorrência de materiais ferruginosos concrecinários é descrita na bibliografia, todavia carecem de descrições mais detalhadas do ponto de vista pedológico. No Planalto do



Diamante cerca de 20% da área foi reconhecida com a presença de materiais ferruginosos, com ocorrências significativas de concreções lateríticas (NAZAR; RODRIGUES, 2019). MMA/IBAMA (2005) também identificou a ocorrência de duricrostas ferruginosas com altos teores de óxidos de ferro. No limite oeste da área de estudos, Cortes (2015) descreve a ocorrência de patamares e níveis concrecionários, com presença de concreções pedogenéticas ferruginosas maciças e detrítico-ferruginosas. Já para o compartimento dos Patamares da Canastra, pouca informação foi encontrada, contudo o trabalho de campo revelou ocorrência significativa de materiais ferruginosos concrecionários.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização combinada dos Índices de Concentração da Rugosidade e Densidade de Drenagem, associados aos dados aerogamaespectrométricos demonstraram potencial para inferir sobre a distribuição espacial dos grupos de solos na área de estudos. Neste sentido, os procedimentos aqui adotados podem ser considerados durante etapas preliminares no mapeamento de materiais superficiais e identificação de áreas de interesse para amostragem e caracterização. Além disso, a integração dos índices de dissecação e padrões do relevo, e os dados radiométricos permitiram inferir sobre algumas das relações entre solo-relevo na área de estudos. Os valores de probabilidade podem indicar áreas de transição ou de maior incerteza, podendo ser utilizadas como orientadoras para novas campanhas de avaliação, e coleta de dados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES pela concessão de bolsa de estudos que financiou esta pesquisa. A CODEMGE pela conceção dos dados aerogamaespectrométricos. O segundo autor agradece ao CNPq a Bolsa Produtividade em Pesquisa (307951/2018-9). Agradecemos também ao Programa de Pós-graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Unicamp pelo auxílio para a inscrição e participação no evento.

REFERÊNCIAS

BOYLE R. W. Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. **Developments in economic geology**, n.16, p. 71–78, 1982.

BROWN, R.A.; McDANIEL, P.; GESSLER, P.E. Terrain attribute modeling of volcanic ash distributions in northern Idaho. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 179, 2012.



BUTT, C. R. M.; LINTERN, M. J.; ANAND, R. R. Evolution of regoliths and landscapes in deeply weathered terrain - implications for geochemical exploration. **Ore Geology Reviews**. V. 16, p. 167-183, 2000.

CARRIER, F.; BOURDON; B.; PILI, É.; TRUFFERT, C.; WYNS, R. Airborne gamma-ray spectrometry to quantify chemical erosion processes. **J. Geochem. Explor.**, v. 88, 266–270, 2006.

CODEMIG. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos, área7, Patos de Minas, Araxá, Divinópolis. Belo Horizonte, 2006.

CORTES, J.P.S. **Compartimentação e evolução geomorfológica da borda ocidental da Serra da Canastra – MG**. 2015. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2015.

CPRM; CODEMIG. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2014. Escala 1:1.000.000.

CPRM. **Mapa de Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2010. Escala 1:1.000.000.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, Australia, v. 17, n. 2, p. 187–200, Jan. 1997.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. – 5. ed., rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

EMBRAPA. **Caracterização de uma topossequência no Parque Nacional da Serra da Canastra, MG/ VASCONCELOS, V. S. [et al.]** – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 63p.

GONÇALVES, B. F.; SAMPAIO, E. E. S. Interpretação de mapas aerogeofísicos magnéticos e gamaespectrométricos no norte da faixa araguaí. **B. Geoci. Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 21, n.1, p. 149-174, 2013.

HAMMOND, T.O.; VERBYLA, D.L. Optimistic bias in classification accuracy assessment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, p. 1261-1266, 1996.

HERRERA, I. L. I. E.; SILVA FILHO, E. P.; IZA, E. R. H. F.; HORBE, A. M. C. Utilização de dados gamaespectrométricos no apoio à cartografia geomorfológica. In: XI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 11., **Anais [...]**. Maringá, PR: UGB, 2016. p. 1-10.

HERRMANN, L.; SCHULER, U.; RANGUBPIT, W.; ERBE, P.; SURINKUM, A.; ZAREI, M.; STAHR, K. The potential of gamma-ray spectrometry for soil mapping. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 19., **Anais [...]**. Birsbane: 2010. p. 117-120.

IBGE. **Mapeamento de Recursos Naturais – Base Contínua de Geomorfologia do Brasil por Unidades da Federação**. 2019. Escala 1:250 000.



IZA, E. R. H. F.; HORBE, A. M. C.; SILVA, A. M. Boolean and fuzzy methods for identifying lateritic regoliths in the Brazilian Amazon using gamma-ray spectrometric and topographic data. **Geoderma**, n. 269, p. 27-38, 2016.

KING, L. C. A. Geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro, n. 2, p. 147-265, 1956.

LADEIRA, F. S. B. **Paleossolos silicificados na Serra de Itaqueri, Itirapina/SP**: subsídios para a reconstituição paleoambiental. 2002. Tese (Doutorado em Geografia) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, p. 159-174, 1977.

MAURO, M. F.; VALADÃO, R. C. Organização estrutural da paisagem da Serra da Canastra. **Sociedade Natureza**, Uberlândia, MG. v. 30, n. 1, p. 53-49, 2018.

McBRATNEY, A. B.; MENDONCA SANTOS, M.L. & MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, p. 3-52, 2003.

MMA/IBAMA. **Plano de Manejo da Serra da Canastra**. 2005. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades_coservacao/PM_PNSC_Resumo_Executivo.PDF>. Acesso em: 20 mai. 2021.

MOONJUN, R.; SHERESTHA, D. P.; JETTEN, V. G.; van RUITENBEEK, F. J. A. Application of airborne gamma-ray imagery to assist soil survey: A case study from Thailand. **Geoderma**, v. 289, p. 196-212, 2017.

MOTTA, P. E. da; BARUQUI, A. M.; SANTOS, H. G. dos. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região do Alto Paranaíba, Minas Gerais. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 238 p.

NAZAR, T. I. S. M. **O Chapadão do Diamante na Serra da Canastra/MG, BRASIL**: caracterização geomorfológica e análise integrada do meio físico a partir de dados multifontes. 2018. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

NAZAR, T. I. S. M.; RODRIGUES, S. C. Mapping and analysis of surface geocover in the Chapadão do Diamante – MG – Brazil. **Mercator**, Fortaleza, v. 18, p. 1-17, 2019.

OLLIER, C. D. Laterite profiles, ferricrete and landscape evolution. **Zeitschrift für Geomorphologi**. Stuttgart, n. 35, p. 165-173, 1991.

RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais**. Folhas Rio de Janeiro /Vitória. MME. Rio de Janeiro, 1983.

REINHARDT, N.; HERRMANN, L. Gamma-ray spectrometry as versatile tool in soil Science: A critical review. **J. Plant. Nutr. Soil. Sci.**, p. 1-19, 2018.

RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M. S.; LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terrae Didática*, v. 10, p. 29-51, 2013.



ROSOLEN, V.; BUENO, G. T.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R.; DE SOUSA COELHO, C. V.; ISHIDA, D. A.; GOVONE, J. S. Evolution of iron crust and clayey Ferralsol in deeply weathered sandstones of Marília Formation (Western Minas Gerais State, Brazil). **Journal of South American Earth Science**, v. 79, p. 421-430, 2017.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos. 2006.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, n.6, São Paulo: Edusp, p. 17-30, 1992.

SAADI, A. **Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais**. 1991. 285 f. Tese (Professor Titular) – Departamento de Geografia, IGC, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1991.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de Concentração da Rugosidade: uma Nova Proposta Metodológica Para o Mapeamento e Quantificação da Dissecação do Relevo como Subsídio a Cartografia Geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 15, n. 1, (Jan-Mar) p. 47-60, 2014.

UFV - CETEC - UFLA - FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em:
<<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acesso em: 20 de jan. de 2021.

VALADÃO, R. C. Geodinâmica de Superfícies de Aplainamento, Desnudação Continental e Tectônica Ativa como Condicionantes da Megageomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n.2, p. 77-90, 2009.

VALERIANO M. M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul, São José dos Campos, SP INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p., 2004.

VASCONCELOS, V. **Classificação das formas de terreno e a sua relação com os solos do Chapadão do Zagaia, Serra da Canastra – MG**. 2011. 91 f. Dissertação – Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

VASCONCELOS, V.; MARTINS, E. S.; CARVALHO JUNIOR, O. AB.; MARQUES JUNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; COUTO JUNIOR, A. F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R. A. T.; REATTO, A. Modelos de evolução pedogeomorfológica da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14., n. 2, p. 197-212, 2013.

WEISS, A. D. Topographic Positions and Landforms Analysis. Conference Poster. In: ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE, San Diego, CA, p. 9-13, 2001.