



MARCELO MANCINI

**MORFOMETRIA DIGITAL DE SOLOS COM HORIZONTES
GENÉTICOS ENTERRADOS COM APOIO DE SENSORES
PRÓXIMOS**

LAVRAS – MG

2022

MARCELO MANCINI

**MORFOMETRIA DIGITAL DE SOLOS COM HORIZONTES
GENÉTICOS ENTERRADOS COM APOIO DE SENSORES
PRÓXIMOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

Orientador

Prof. Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva

Co-orientador

Prof. Dr. Nilton Curi

LAVRAS – MG

2022

RESUMO

Solos são essenciais para diversas atividades humanas; são a base para a produção de alimentos, sustentação majoritária das obras de construção civil e berço da maior parte da vegetação na crosta continental. Entretanto, o solo é um corpo extremamente heterogêneo, variando não apenas ao longo da paisagem, mas também em profundidade. Variação essa que possui implicações diretas em seu uso. Até o presente, o estudo do solo usa principalmente artifícios mecânicos e visuais para sua caracterização em campo, sendo auxiliado por análises laboratoriais posteriormente. O objetivo deste trabalho foi testar a utilização de novas tecnologias –sensores próximos– para aprimorar os métodos de caracterização de perfis de solos e relações com sua gênese. Foram estudados três perfis de solo com horizontes genéticos enterrados; i.e., solos enterrados, formados pela deposição de sedimentos acima de solo preexistente. Os perfis, localizados em Lavras, Minas Gerais, Brasil, foram classificados como Organossolo Háplico (OX), Cambissolo Háplico (CX) e Gleissolo Háplico (GX). Os perfis de solos foram analisados em campo e amostrados em um grid de 8 linhas e 5 colunas (15 x 15 cm), perfazendo 40 amostras por perfil. Além de análises químicas e físicas, as amostras foram analisadas por espectrometria de fluorescência de raios-X portátil (pXRF) e espectroscopia de refletância difusa na faixa de luz visível e infravermelho próximo (Vis-NIR). Os dados de pXRF foram espacializados ao longo dos perfis para avaliar-se a distribuição espacial dos teores elementares dentro e entre horizontes. Os dados espectrais do Vis-NIR identificaram diferentes características dentro do horizonte hístico de OX em função da profundidade, assim como as variações do teor de matéria orgânica no horizonte A enterrado de CX. Na distribuição de teores elementares fornecida pelo pXRF foram observadas descontinuidades na composição química dos três perfis próximo a 110 cm de profundidade; indicação de diferenças químicas no material de origem. Ambos os sensores detectaram maior teor de óxidos de ferro no manto superficial do OX e GX, sugerindo que os sedimentos depositados têm sua origem em Latossolos ou Argissolos desenvolvidos de granito-gnaisse e gabro, classes de solo e materiais de origem comuns no entorno dos perfis estudados. Os três perfis de solos apresentaram deposição de sedimentos provenientes das áreas mais altas ao seu redor e, portanto, descontinuidade de seus materiais de origem ao longo do perfil, evidenciada por contrastantes atributos químicos e físicos expressos entre horizontes geneticamente distintos. Os sensores foram capazes de detectar e quantificar características importantes que diferenciam os horizontes entre si, além de variações dentro dos próprios horizontes, e sua gênese e material de origem, provando-se ferramentas promissoras para estudos pedológicos, nos quais há sempre grande demanda por maior quantidade de dados para auxiliar a compreensão da pedogênese.

Palavras-chave: Solos tropicais. Pedogênese. Descontinuidade litológica. Vis-NIR. pXRF

ABSTRACT

Soils play a key role in human activities; they are the basis of food production, sustain the majority of human infrastructure and are the cradle of most of the vegetation above the continental crust. However, soils are very heterogeneous and vary not only along the landscape, but also with depth. Such variability has direct impact in the possible uses of each soil. Currently, soil studies use mainly visual and mechanical methods to characterize soils in-situ, later complemented by laboratory analyses. The objective of this study was to test new technologies –proximal sensors– to improve the methodologies of soil profile characterization and soil genesis studies. Three soil profiles with buried genetic horizons were studied; i.e., soils in which a mantle of sediments was deposited above a preexisting soil. Soil profiles were located in Lavras, Minas Gerais, Brazil, and were classified as Haplic Organosol (OX), Haplic Cambisol (CX) and Haplic Gleysol (GX). Profiles were analyzed in the field and sampled in a grid with 8 lines and 5 columns (15 x 15 cm), summing 40 samples per profile. Besides physical and chemical analyses, soils were analyzed by portable X-ray fluorescence spectrometry (pXRF) and visible-infrared diffuse reflectance spectroscopy (Vis-NIR). Data from pXRF were spatialized along profiles to assess the spatial distribution of elemental contents within and between the horizons. There was remarkable variation of chemical and physical characteristics between buried genetic horizons. Spectral data from Vis-NIR identified different characteristics within the histic horizon of OX as a function of depth, and highlighted differences in the organic matter content in the buried A horizon of CX. The spatial distribution of elemental contents obtained from pXRF showed discontinuities in the chemical composition of the three profiles close to 110 cm of depth; an indication of chemical differences in the parent material. Both sensors detected higher contents of iron oxides in the superficial deposited mantle of OX and CX, suggesting that sediments were originated from Latosols or Argisols derived from granite-gneiss and gabbro, common soil class and parent materials in the region. Proximal sensors made clear that the three soils presented sediment deposition from higher surrounding areas and, hence, presented parent material discontinuity. Sensors were capable of detecting variations within horizons and quantifying key properties of soils that differentiate horizons from each other according to their genesis and parent material, proving to be promising tools for pedological studies, which invariably demand for greater amounts of data to better comprehend pedogenetic processes.

Keywords: Tropical soils. Pedogenesis. Lithologic discontinuity. Vis-NIR. pXRF

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1 Solos enterrados ou paleossolos?	8
2.1.1 Solos enterrados	8
2.1.2 Paleossolos	9
2.2 Sensores próximos na Ciência do Solo	9
2.2.1 Heterogeneidade dos solos	9
2.2.2 Espectroscopia de luz visível e infravermelho	11
2.2.3 Espectrometria de fluorescência de raios-X	13
2.3 Morfometria digital	15
3 MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 Área de estudo	17
3.2 Classificação dos perfis de solo	18
3.3 Amostragem e análises laboratoriais	19
3.4 Análises com sensores próximos	19
3.4.1 Sensor portátil de raios-X (pXRF)	19
3.4.2 Espectrômetro de refletância difusiva de luz visível e infravermelho (Vis-NIR) .	20
3.5 Análises estatísticas e espaciais	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 Caracterização química e física dos solos	21
4.1.1 Organossolo Háplico (OH)	21
4.1.2 Cambissolo Háplico (CH)	23
4.1.3 Gleissolo Háplico (GH)	23
4.2 Perfil espectral nas faixas do visível e infravermelho	24
4.2.1 Organossolo Háplico (OH)	24
4.2.2 Cambissolo Háplico (CH)	26
4.2.3 Gleissolo Háplico (GH)	27
4.3 Teores elementais obtidos via pXRF	27
4.3.1 Organossolo Háplico (OH)	27

4.3.2	Cambissolo Háplico (CH)	29
4.3.3	Gleissolo Háplico (GH)	29
5	CONCLUSÕES	30
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

A presença universal do solo na vida humana é indubitável. Sua matriz é base para a produção de alimentos, é fundação das obras urbanas, fonte de materiais para atividades humanas, e protagonista em uma gama de serviços ambientais (YOUNG; CRAWFORD; RAPPOLDT, 2001). Sua complexidade, entretanto, é grande como sua importância. O solo é produto de uma intrincada interação de fatores ambientais, especialmente de seu material de origem, do clima, tempo de formação, do relevo em que se encontra e da biota que o transforma incessantemente (JENNY, 1941). Naturalmente, a resultante heterogeneidade espacial e temporal de seus atributos é desafio recorrente na pedologia.

Nas últimas décadas, porém, avanços tecnológicos abriram novas portas para enfrentar tal desafio (YOUNG; CRAWFORD, 2004), tornando possível a obtenção de dados em volumes antes impensáveis, a custos progressivamente menores (WANZEK *et al.*, 2018).

Genericamente, o termo morfometria refere-se à quantificação da forma das coisas (do grego: *morfo*, forma; *metria*, medida). Na Ciência do Solo, morfometria representa a quantificação de atributos do solo que podem ser observados ao longo de perfis, como estrutura, variações de cor, textura, as quais permitem aos cientistas inferir sobre atributos físicos e químicos dos solos (HARTEMINK; MINASNY, 2014). Tal descrição dos perfis de solo é peça central na pedologia e, até o passado recente, dependia majoritariamente de medições realizadas por instrumentos mecânicos e informações visuais. Entretanto, recentemente novas ferramentas tecnológicas revolucionaram os métodos de coleta e análise de dados pedológicos, fornecendo meios práticos para a digitalização de imagens e objetos (MOHAMMED *et al.*, 2016) e análises além da luz visível (ADAMCHUK *et al.*, 2004).

Ainda assim, os avanços atingiram primeiramente os estudos mais amplos visando a entender a variação horizontal dos solos ao longo da paisagem (BHATTACHARYA; CHATTERJEE; ACHARYA, 2021, MENEZES *et al.*, 2014), sendo pouco utilizados na caracterização morfométrica de perfis. Apenas recentemente técnicas mais sofisticadas começaram a ser aplicadas verticalmente, no estudo da variabilidade espacial de solos em profundidade. Buscando cunhar este moderno conjunto de ferramentas e técnicas aplicadas ao estudo de perfis de solo, Harte-mink e Minasny (2014) introduziram o termo “*digital soil morphometrics*” – morfometria digital de solos.

Entre os diversos equipamentos que estenderam as análises pedológicas para além do espectro visível, ganham destaque recente os sensores próximos (TERRA; DEMATTÊ; VISCARRA

ROSSEL, 2018). Suas qualidades incluem a capacidade de utilização em campo, facilidade de operação e menor custo. São qualidades relevantes considerando-se a variabilidade espaço-temporal do solo, não apenas ao longo da superfície, mas também em profundidade, demandando grande número de amostras para estudos representativos. Dentre os sensores próximos utilizados na morfometria digital de solos, este trabalho foca no uso dos mais presentes na literatura recente: o espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (pXRF) e o espectroscópio de refletância difusa nas faixas de luz visível e infravermelho próximo (Vis-NIR).

Um exemplo de como tais tecnologias podem auxiliar na pedologia é sua aplicação em solos que apresentam sequência incomum de horizontes. Os solos, a depender de seu ambiente de formação, apresentam feições características em função da profundidade. Em algumas situações, porém, perfis apresentam horizontes genéticos enterrados, possuindo sequência de horizontes que fogem ao esperado para uma determinada classe de solo, como, por exemplo, um horizonte composto por material bem diferente do restante do perfil (material alóctone vs. material autóctone). Isso indica que um processo de deposição de sedimentos recobriu um solo pretérito, formando um manto com características diferentes acima. São os denominados solos enterrados (USDA, 2010). Quando solos nessas condições preservam materiais muito antigos, conservando informações importantes sobre o paleoambiente em que foram formados, podem também ser chamados de paleossolos (ALEXANDROVSKIY *et al.*, 2004). São interessantes exemplos da riqueza de informações que pode ser preservada em profundidade no solo.

Assim, este trabalho objetivou examinar solos com horizontes genéticos descontínuos utilizando a morfometria digital, buscando avaliar o uso de sensores próximos para potencializar o estudo dos solos em profundidade. Em conjunto com análises morfológicas e laboratoriais tradicionais, os sensores pXRF e Vis-NIR foram aplicados visando a: i) caracterizar os atributos físico-químicos de três perfis de solo enterrados em Lavras, Minas Gerais; ii) testar o potencial dos sensores em fornecer dados para o estudo pedogenético dos perfis; iii) comparar os dados laboratoriais e aqueles fornecidos pelos sensores próximos. A hipótese é que os sensores serão capazes de auxiliar na caracterização morfométrica dos perfis, especialmente dos horizontes genéticos enterrados, potencializando as técnicas de morfometria tradicionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Solos enterrados ou paleossolos?

O termo “solo enterrado” é uma maneira genérica de se referir a solos que foram recobertos por deposição de material. O termo nasceu da necessidade de classificar solos alvos de deposição recente, como ocorre comumente em planícies fluviais que recebem sedimentos; regiões vulcânicas onde há deposição de cinzas; locais onde dunas se movimentam (SMITH, 1986); e onde sedimentos foram depositados após transporte eólico e degelo (ASHTEKAR; OWENS, 2013).

2.1.1 Solos enterrados

Conceitualmente, portanto, um solo enterrado pressupõe um manto de material recente, pouco alterado, depositado sobre o solo anteriormente formado no local. A alteração do material é destacada pois, caso haja pedogênese significativa, as propriedades dos horizontes misturam-se, não sendo possível dizer que o manto depositado acima e o solo formado abaixo são completamente descontínuos. Porém, ainda que a pedogênese tenha ocorrido e não se possa considerar que o material acima e abaixo são independentes, descontinuidades entre os horizontes podem permanecer. Para tentar diferenciar solos completamente distintos daqueles que já começaram a homogenizar-se, o sistema americano de classificação de solos traz dois conceitos: o de solos enterrados e horizontes genéticos enterrados (USDA, 2010).

Segundo nota técnica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), um solo enterrado é aquele com manto de material recente de espessura ≥ 50 cm, ou entre 30 e 50 cm contanto que a espessura do manto seja no mínimo metade daquela dos horizontes diagnósticos do solo enterrado.

O manto de material recente (Holoceno ou mais jovem) necessita ser composto por material pouco alterado, admitindo-se que tenha horizonte A e/ou horizonte câmbico, mas nenhum outro horizonte diagnóstico. Não há critério mínimo de espessura.

Portanto, se o manto acima não se enquadra nos requisitos citados, o solo não é considerado um solo enterrado. Entretanto, não significa que não haja descontinuidade entre os horizontes. Por exemplo, pode haver horizonte A abaixo de material que sofreu pedogênese significativa, ou o manto sobrejacente pode ser demasiadamente raso para que o solo se enquadre como enterrado. Nestes casos, diz-se que os solos possuem horizontes genéticos enterrados, mas não são solos

enterrados. Deste modo, todo solo enterrado possui horizontes genéticos enterrados, mas nem todos os que possuem tais horizontes são classificados como solos enterrados.

Assim, em resumo, um solo enterrado é aquele que possui horizontes genéticos –com gênese anterior ao soterramento– enterrados por material com ao menos 50 cm de espessura que sofreu pouca pedogênese e, portanto, não iniciou o processo de homogeneização com o solo anterior formado abaixo (USDA, 2010).

2.1.2 Paleossolos

Quando trazem informações sobre épocas passadas, tanto ambientais como mudanças no clima, quanto antropogênicas como traços de civilizações pretéritas, os solos enterrados são também chamados de paleossolos (PIETSCH; KUEHN, 2017). O campo da Ciência do Solo que estuda tais tipos de solo é denominada paleopedologia.

Com o soterramento do solo, a dinâmica de suas propriedades é completamente alterada. No solo soterrado, acúmulo de material orgânico praticamente cessa e o transporte de partículas minerais e água provenientes da superfície reduz significativamente (MITUSOV *et al.*, 2009). Assim, propriedades genéticas causadas pelo regime hídrico e características físico-químicas dos solos enterrados são preservadas, como o teor de matéria orgânica, a estrutura e a composição mineralógica.

A pedogênese depende fortemente das condições climáticas. Portanto, naturalmente a preservação destas propriedades guardam informações valiosas sobre o clima em que formaram-se os paleossolos. Muitos estudos exploram traços das mudanças climáticas entre o Pleistoceno e o Holoceno por meio dos solos (BIANCHINI *et al.*, 2022, MEIER *et al.*, 2014).

O processo de soterramento pode também indicar os diferentes usos do solo por civilizações antigas. Atividades agrícolas, desmatamento e deposição de resíduos são exemplos de interferências geradas pela ocupação humana que podem permanecer no solo (PIETSCH; KUEHN, 2017).

2.2 Sensores próximos na Ciência do Solo

2.2.1 Heterogeneidade dos solos

Os solos são o resultado do intemperismo de rochas ou sedimentos depositados na crosta terrestre expostos aos agentes de intemperismo. O modelo conceitual clássico que relaciona o solo formado aos fatores ambientais responsáveis por sua gênese foi proposto por Jenny em

1941 (JENNY, 1941), com base em ideias de Dokuchaev, e define cinco variáveis principais que regem as propriedades do solo: clima (Cl), organismos (o), relevo (r), material de origem (p – *parent material*) e tempo (t), além de outros fatores ambientais (...) (Eq. 1).

$$Solo = f(Cl, o, r, p, t, \dots) \quad (1)$$

Naturalmente, um corpo cujas propriedades dependem de tantos fatores distintos tende a ser heterogêneo ao longo da paisagem. Solos em relevos íngremes tendem a ser rasos devido ao carregamento de partículas pela água (r), solos em regiões frias tendem a preservar maior teor de matéria orgânica (Cl e o), solos em regiões que sofreram glaciação recente são geralmente menos desenvolvidos pois retomaram seu processo de formação apenas após seu degelo (t). E mesmo em condições muito semelhantes, um solo pode possuir atributos bruscamente diferentes de outro adjacente apenas ao mudar-se a rocha –ou sedimentos– formadora abaixo (p). Importante notar que os fatores de formação do solo não agem apenas ao longo da superfície (paisagem), mas também em profundidade, fazendo do solo um corpo tridimensional, complexo e heterogêneo.

Essa grande variação espacial de propriedades é um desafio enfrentado pela Ciência do Solo desde sua concepção em meados século XIX. Hartemink *et al.* (2013) citam uma discussão entre seguidores daquele que é considerado o fundador da pedologia, V. V. Dokuchaev, e G. F. Nafedov em 1908, na qual Nafedov alegava que o agrupamento dos solos em classes possuía pouco uso prático, já que os atributos do solo variavam demasiadamente dentro de uma mesma classe. Por isso –defendia Nafedov– dever-se-ia mapear as propriedades separadamente, para depois agruparem-se regiões com propriedades similares. Suas ambições, porém, não eram compartilhadas por seus contemporâneos, e não havia dados e instrumentação suficientes para pôr em prática sua ideia.

Entretanto, mais de 100 anos depois, apesar dos grandes avanços na pedologia e no mapeamento de solos, a demanda por maior detalhamento de informações pedológicas continua crescendo e ainda enfrenta dificuldades (DHARUMARAJAN *et al.*, 2019, LAMICHHANE; KUMAR; ADHIKARI, 2021, RIVIECCIO *et al.*, 2020). A diferença entre o século passado e o atual é que, com o advento e evolução da computação, uma gama de novos métodos e ferramentas foram introduzidos na Ciência do Solo, aumentando a capacidade de análise e obtenção de dados. O avanço tecnológico permitiu o surgimento de metodologias como o mapeamento digital de solos, termo cunhado por McBratney, Santos e Minasny (2003), hoje área já bem difundida que visa ao detalhamento de informações pedológicas combinando-se dados labora-

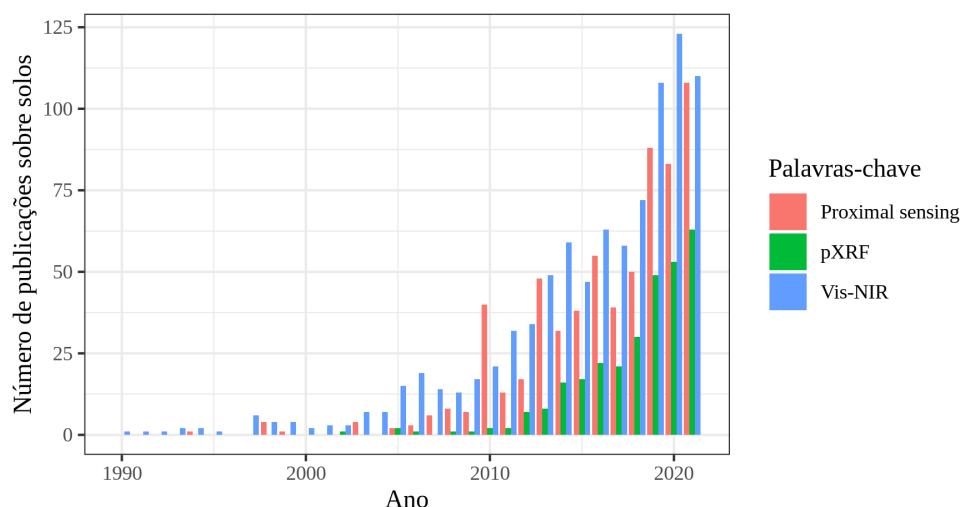
toriais e espaciais analisados através de técnicas de estatística computacional. Entretanto, tais avanços só foram possíveis graças ao uso de equipamentos como os sensores proximais e remotos, que possibilitaram a coleta ágil de dados em grandes áreas. Aqui, focar-se-á nos sensores utilizados à pequenas distâncias das amostras, os chamados sensores próximos.

2.2.2 Espectroscopia de luz visível e infravermelho

Uma das primeiras técnicas de análise de refletância de luz a serem utilizadas na análises de solos foi a medição da refletância do espectro visível (entre 350 e 780 nm) e infravermelho próximo (entre 780 e 2500 nm) dos solos, na busca por traços espectrais que diferenciassem seus atributos.

A análise do espectro visível e infravermelho próximo de maneira remota começou a popularizar-se nos anos 1970, depois do lançamento do satélite LANDSAT-1, quando dados espectrais da superfície tornaram-se mais acessíveis (GE; THOMASSON; SUI, 2011). A análise por sensoriamento próximo também já era conduzida na mesma época. Já no começo da década de 1970 pode-se encontrar trabalhos sobre o tema, como o de Condit (1970), que analisou a refletância entre os comprimentos de onda 320 e 1000 nm em 160 amostras de solo coletadas nos Estados Unidos em 36 estados, notando três tipos característicos de curvas espectrais entre suas amostras. Mas foi principalmente a partir dos anos 1990 que o número de publicações sobre sensoriamento próximo passaram a crescer consideravelmente (Figura 1).

Figura 1 – Número de publicações sobre solos entre 1990 e 2021 utilizando as palavras-chave “Proximal sensing”, “pXRF”, “Vis-NIR”. Busca realizada na base de dados Web of Science, em março de 2022.



Fonte: Do autor (2022)

O espectroscópio de refletância difusa de radiação visível e infravermelho próximo (Vis-NIR) é um sensor próximo que captura a radiação refletida pelo objeto, no caso as amostras de solo, em cada comprimento de onda do espectro eletromagnético nas regiões do visível e infravermelho próximo. Fornece, portanto, dados que permitem inferir sobre a interação entre a radiação eletromagnética e os constituintes minerais e orgânicos do solo, a depender de quais porções da radiação são absorvidas ou refletidas pelos solos (TERRA; DEMATTÊ; VISCARRA ROSSEL, 2018).

Quando a luz atinge um objeto, ela interage com o mesmo, podendo atravessá-lo, ser absorvida ou refletida. Os fôtons que são refletidos em cada comprimento de onda podem ser detectados, deixando claro quais comprimentos de onda foram absorvidos pelo material em maior ou menor intensidade. A absorção de fôtons pode ocorrer por três tipos de interação entre o fôton e a matéria: transições eletrônicas, vibracionais ou rotacionais (FANG *et al.*, 2018). Nas regiões do espectro visível e infravermelho próximo, as interações pertinentes são as transições eletrônicas e vibracionais.

Nas transições eletrônicas, ao receber um fôton, a energia absorvida pelo átomo pode levar um elétron a um orbital mais energético (denominada transição d-d), ou fazer com que um elétron seja transferido de um átomo para outro (transferência de carga), como ocorre, por exemplo, em óxidos de ferro (FANG *et al.*, 2018). As transições vibracionais correspondem às interações entre os fôtons e as ligações químicas, fazendo-as vibrar em maior frequência. Exemplos de ligações que interagem com a radiação visível e infravermelho são os grupos O-H, C-H, C-C e N-H.

A absorção dos fôtons por estes fenômenos físicos gera padrões diferentes de refletância (aquele que não foi absorvido) a depender da composição do material (ZHAO *et al.*, 2018). Os óxidos de ferro mais comuns no solo, hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) e goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), são exemplos de minerais que possuem padrões de refletância característicos (FANG *et al.*, 2018). Na hematita, absorções (diminuições da refletância) próximas aos comprimentos de onda 880, 650 e 520 nm são típicas; na goethita, fortes absorções características podem ser notadas próximas a 920, 600 e 480 nm (DEMATTÊ *et al.*, 2015). Alguns argilominerais comuns em solos brasileiros, como a caulinita, também possuem assinaturas espectrais diagnósticas, como grande absorção em 1400 e 2200 nm, causada pela transição vibracional nos grupos OH e Al-OH,

É graças aos padrões de absorção típicos de cada material, que funcionam como uma assinatura, que é possível inferir atributos dos solos a partir de dados espectrais. As explorações

de seus usos continuam em avanço crescente na literatura, sendo alguns poucos exemplos: a inferência de minerais dos solos (COBLINSKI *et al.*, 2021), a estimativa de atributos físicos e químicos (e.g., textura e teor trocável de nutrientes) (BENEDET *et al.*, 2020, ZHANG; HARTEMINK, 2020) e a detecção de poluentes nos solos (CORRADINI *et al.*, 2019).

2.2.3 Espectrometria de fluorescência de raios-X

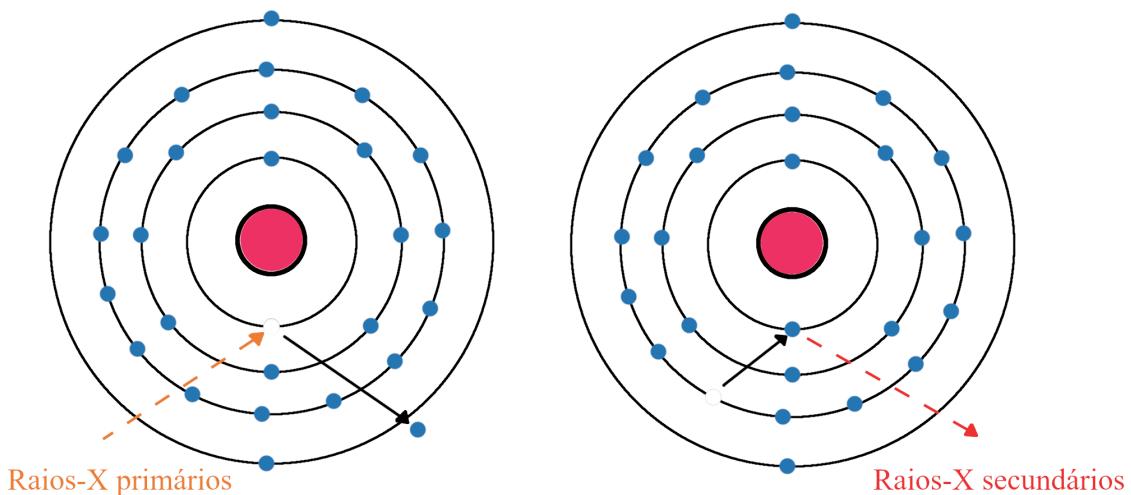
O uso de raios-X no estudo da matéria não é tão recente. Desde sua descoberta, em 1895, por Wilhelm Röntgen, não levou muito tempo até que fossem aplicados no estudo da estrutura cristalina de materiais por Max von Laue, em 1913, através da técnica que ficou conhecida como espectrometria de difração de raios-X, muito usada em estudos de mineralogia até os dias atuais (GLANZMAN; CLOSS, 2007). Pouco depois, na década de 1920, os raios-X passaram também a ser utilizados na quantificação da composição química dos materiais. Ao serem atingidos por raios-X, os átomos emitem uma radiação secundária característica, a chamada fluorescência, que permite sua quantificação. A técnica ficou conhecida como espectrometria de fluorescência de raios-X (*X-ray fluorescence spectrometry – XRF*).

As técnicas para quantificação química, porém, só se popularizaram depois da década de 1950, depois que o primeiro equipamento de XRF fora disponibilizado comercialmente. Ainda assim, os espectrômetros de raios-X eram essencialmente equipamentos de laboratório, de elevado preço, com necessidade de preparação minuciosa das amostras e de considerável conhecimento técnico para a realização das análises. O uso de XRF na Ciência do Solo pode ser atribuído a uma tendência que começou do final da década de 1970, quando foram comercializados pela primeira vez os equipamentos portáteis de XRF (pXRF) (LEMIÈRE, 2018). A portabilidade e seu fácil uso permitiram análises rápidas tanto em campo quanto em laboratório, aos custos de menor precisão devido à miniaturização da tecnologia. Porém, apesar do desenvolvimento da tecnologia que permitiu a criação de espectrômetros portáteis de raios-X (pXRF) ter começado há 40 anos, foi apenas nos últimos 10 anos que o número de trabalhos sobre o tema na Ciência do Solo viu um crescimento expressivo (Figura 1), havendo ainda muito a ser explorado sobre seu uso nas geociências (YOUNG *et al.*, 2016).

A espectrometria de XRF baseia-se no princípio de que, quando um átomo recebe raios-X primários de alta energia, seus elétrons absorvem energia, elevando-se para orbitais mais distantes do núcleo. O estado mais energético, porém, não é estável. Os elétrons excitados, portanto, voltam ao seu orbital anterior, liberando a energia previamente absorvida em forma de raios-X

secundários, ou fluorescência (Figura 2). Cada elemento emite raios-X secundários em energias características de transição elétrons entre orbitais dos átomos, permitindo sua identificação. A intensidade dos raios-X secundários detectados é proporcional à concentração do elemento, permitindo sua quantificação (KALNICKY; SINGHVI, 2001, RIBEIRO *et al.*, 2017).

Figura 2 – Ilustração da liberação de fluorescência característica (raios-X secundários) após a irradiação do átomo por raios-X primários. O elemento na ilustração é o Fe ($Z = 26$).



Fonte: Do autor (2022)

A quantificação dos diferentes elementos depende da capacidade de contar os pulsos de radiação secundária emitida por cada átomo. Elementos mais leves emitem radiação menos energética, de mais difícil detecção (SILVA *et al.*, 2021). A energia da radiação secundária também está relacionada com a energia recebida pelo átomo (emitida pelo equipamento). Portanto, a miniaturização da tecnologia em equipamentos portáteis (pXRF) aumenta a praticidade, mas diminui a capacidade de detecção de elementos leves, já que usam emissores de menor energia (YOUNG *et al.*, 2016). Os pXRF, geralmente, são capazes de detectar elementos do Mg ($Z = 14$) até o U ($Z = 92$).

A quantificação dos diferentes elementos depende da capacidade de contar os pulsos de radiação secundária emitida por cada átomo. Elementos mais leves emitem radiação menos energética, de mais difícil detecção (SILVA *et al.*, 2021). A energia da radiação secundária também está relacionada com a energia recebida pelo átomo (emitida pelo equipamento). Portanto, a miniaturização da tecnologia em equipamentos portáteis (pXRF) aumenta a praticidade, mas diminui a capacidade de detecção de elementos leves, já que usam emissores de menor energia (YOUNG *et al.*, 2016). Os pXRF, geralmente, são capazes de detectar elementos do Mg ($Z = 14$) até o U ($Z = 92$).

Ainda que menos potentes e precisos que os convencionais equipamentos de XRF de laboratório, o pXRF tem atraído a atenção da Ciência do Solo recentemente pela possibilidade da obtenção de teores totais dos elementos químicos de modo mais simples e portátil (SILVA *et al.*, 2021). Alguns exemplos de seu uso são: a predição de atributos de fertilidade e textura do solo (ANDRADE *et al.*, 2020, FARIA *et al.*, 2020), investigação de processos pedogenéticos (STOCKMANN *et al.*, 2016), o estudo da distribuição de materiais de origem (MANCINI; WEINDORF; CHAKRABORTY; *et al.*, 2019, MANCINI; WEINDORF; SILVA; *et al.*, 2019) e a análise de contaminantes no solo (HORTA *et al.*, 2015, ROUILLOON; TAYLOR, 2016).

2.3 Morfometria digital

O solo não é bidimensional. Como mencionado anteriormente, o solo não é heterogêneo apenas ao longo da paisagem, horizontalmente, mas também verticalmente, em profundidade. Apesar das novas tecnologias, como os sensores citados, estarem sendo testadas amplamente no estudo da variabilidade espacial das propriedades dos solos horizontalmente, poucos foram utilizados em caracterizações de perfis (HARTEMINK; MINASNY, 2014), especialmente considerando solos tropicais (BENEDET *et al.*, 2022, MANCINI *et al.*, 2021, SILVA *et al.*, 2018).

Não se pode esquecer que o avanço no mapeamento digital de solos se dá pela disponibilidade de dados e conhecimentos sobre os perfis de cada solo. Seja no mapeamento de classes ou de atributos, as informações oferecidas pelos mapas ou já incluem as variações em profundidade indiretamente (informações contidas nas classes de solos), ou necessitam informar a profundidade em que foram mapeadas para que possam ser interpretadas. Entretanto, o nível de detalhes e variações de atributos em profundidade nos perfis através da morfometria digital é maior que aquela expressa em mapas de solos, uma vez que apresentam finalidades diferentes. Assim, juntamente com os esforços contínuos para desenvolver o mapeamento digital, é igualmente importante avançar nas técnicas de caracterização dos perfis de solo.

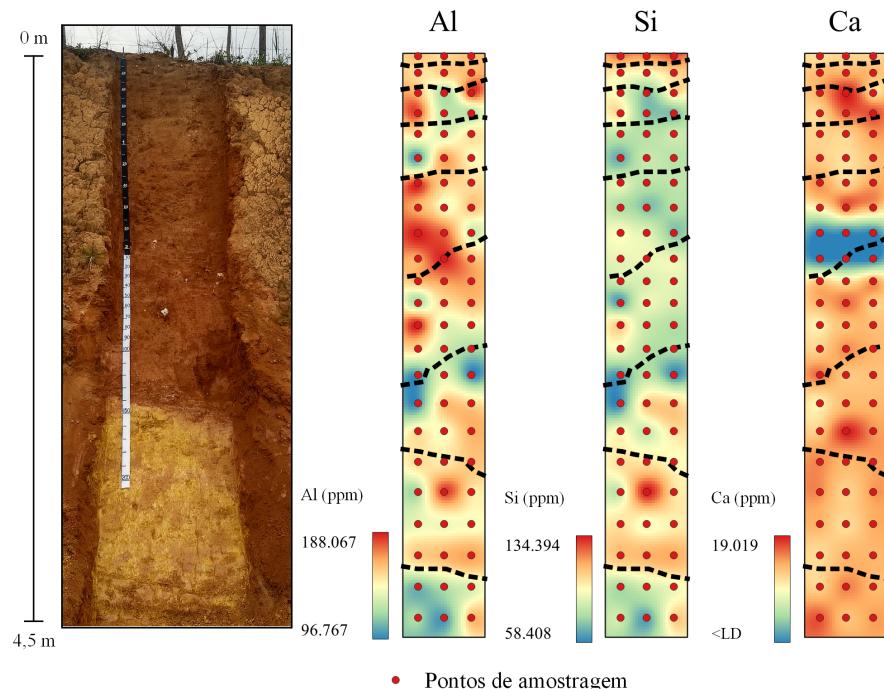
Em sua convocação aos cientistas de solo para a integração do sensoriamento próximo à morfometria na pedologia, Hartemink e Minasny (2014) listam 11 atributos comumente descritos em um perfil de solo que podem receber o auxílio de sensores em sua análise: horizontes e seus limites, textura, cor, estrutura, umidade, mosqueados, consistência, carbonatos, fragmentos de rocha, poros e resistividade.

A descrição de horizontes é um bom exemplo de uma característica importante dos solos cuja descrição pode ser potencializada por sensores. Muitas vezes, as diferenças entre horizontes são

imperceptíveis a olho nu. Nos trópicos, o intemperismo intenso e longo, associado à lixiviação, homogeneiza a aparência dos solos e dificulta ainda mais o processo de separação de horizontes, muitas vezes dependendo de análises laboratoriais para notarem-se as diferenças. Estas, por sua vez, têm um custo e ainda demandam certo tempo, o que limita o número de amostras que podem ser analisadas por perfil.

Estudos recentes, porém, indicam a capacidade de sensores como o pXRF e Vis-NIR em detectar tais diferenças em poucos segundos. Benedet *et al.* (2022) e Mancini *et al.* (2021) estudaram Latossolos com aparência homogênea utilizando os sensores pXRF e Vis-NIR e conseguiram detectar grandes variações químicas ao longo do perfil apesar do alto grau de intemperismo dessa classe de solo (Figura 3). Silva *et al.* (2018) analisaram o teor de elementos em cada fração de tamanho (areia, silte e argila) ao longo de um perfil de solo utilizando o pXRF, avaliando como o intemperismo afeta a distribuição de elementos químicos em cada fração e ao longo dos horizontes.

Figura 3 – Exemplo de morfometria digital de solos. Variações químicas em um Latossolo Vermelho-Amarelo de 4,5 m imperceptíveis a olho nu, cuja análise tradicional seria difícil e custosa pela elevada profundidade do perfil. Perfil localizado em Lavras, Minas Gerais, Brasil. Adaptado de Mancini *et al.* (2021).



Fonte: Adaptado de Mancini et al. (2021)

Existem poucos artigos publicados sobre morfometria digital de solos, apesar da importância da descrição de perfis na Ciência do Solo. Levará tempo até que métodos utilizando imagens

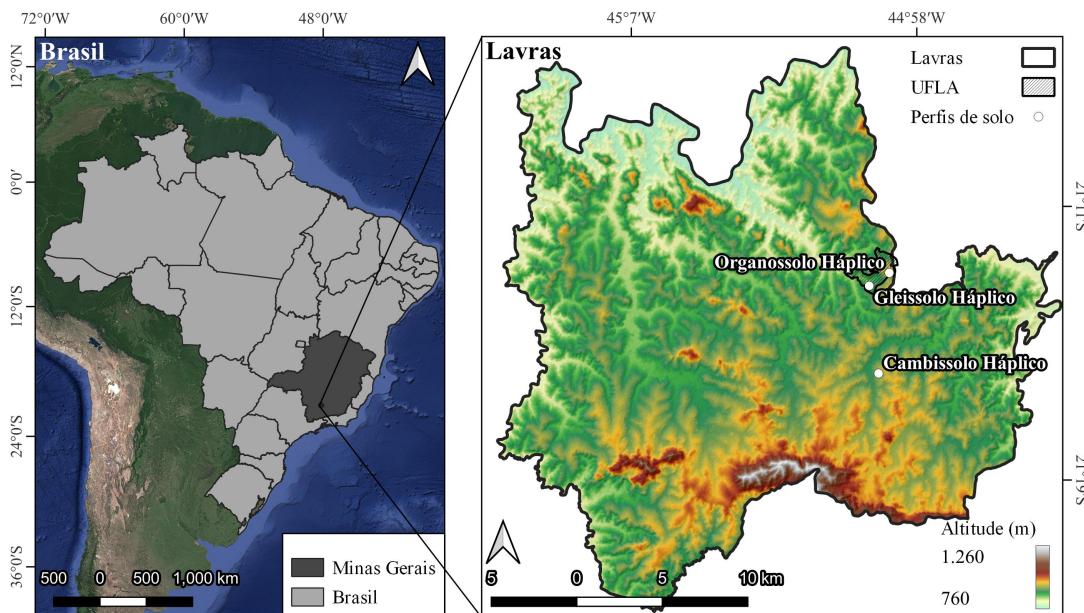
digitais e sensores venham a ser considerados convencionais, mas quando forem, certamente maior qualidade de dados pedológicos será obtida. É neste contexto que este trabalho busca utilizar os sensores pXRF e Vis-NIR para tentar contribuir com esse avanço na avaliação pedológica de perfis de solos e a variação de seus atributos dentro e entre horizontes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no município de Lavras, no Estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 4). O município encontra-se entre as latitudes 21,45° e 21,10°S e longitudes 45,29° e 44,79° W (WGS84). A temperatura média na região é 20,4 °C e a precipitação média anual é 1.460 mm (ALVARES *et al.*, 2013). A altitude do município varia entre 760 e 1.260 m. A vegetação na região é floresta tropical semi-perene (CURI *et al.*, 2017).

Figura 4 – Área de estudo, localização dos perfis de solo estudados e mapa altimétrico da região, em Minas Gerais, Brasil (ASF DAAC, 2015).

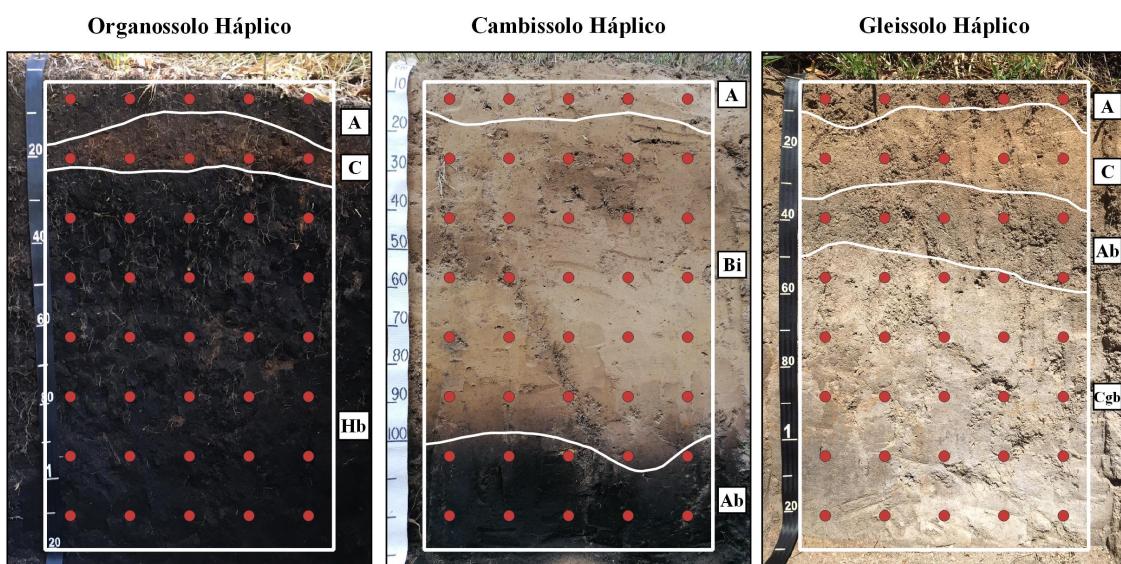


Fonte: Do autor (2022)

3.2 Classificação dos perfis de solo

Foram estudados três perfis, dois dentro do campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e um em estrada rural, próxima à Serra da Bocaina; todos em Lavras, Minas Gerais, Brasil (Figura 4). Os três perfis foram classificados como Organossolo Háplico (OX), Cambissolo Háplico (CX) e Gleissolo Háplico (GX) (Figura 5) (SANTOS *et al.*, 2018). Os materiais de origem estão apresentados na Tabela 1. Os dados dos solos estudados encontram-se na seção Resultados e Discussão.

Figura 5 – Perfis de solo estudados e a divisão de seus horizontes, em Lavras, Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Do autor (2022)

Os três solos possuem horizontes genéticos enterrados, i.e., manto sobrejacente de deposição recente que difere do restante dos horizontes. Entretanto, apenas o CX possui manto de material pouco alterado (horizonte Bi, pouco desenvolvido) com espessura superior a 50 cm, enquadrando-se como solo enterrado. Portanto, CX recebe a classificação do solum formado acima (Cambissolo Háplico) (Figura 5). Os demais solos (OX e GX), com mantos de espessura inferior a 50 cm, possuem horizontes genéticos enterrados pelo manto sobrejacente, mas não enquadram-se como solos enterrados. São, portanto, classificados a partir do solo abaixo do manto, i.e., Organossolo Háplico e Gleissolo Háplico. O sufixo ‘b’ (do inglês, buried) foi utilizado para designar horizontes genéticos enterrados (USDA, 2010).

3.3 Amostragem e análises laboratoriais

Um grid amostral de 8 linhas e 5 colunas (15 x 15 cm) foi utilizado para a coleta de amostras ao longo dos perfis (Figura 5). Assim, foram coletadas 40 amostras por perfil, somando 120 amostras no total. Para as demais análises, a primeira linha de pontos foi considerada como o ponto 5 cm de profundidade.

Tabela 1 – Dados topográficos e material de origem de três perfis de solo em Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Classe de solo	Altitude (m)	Declividade (%)	Material de origem
Organossolo Háplico	931	5,11	Sedimentos
Cambissolo Háplico	932	11,31	Quartzito + Sedimentos
Gleissolo Háplico	876	17,59	Gnaisse + Sedimentos

Fonte: Do autor (2022)

As amostras foram secas ao ar (terra fina seca ao ar – TFSA) e peneiradas com malha de 2 mm. As seguintes análises químicas foram realizadas: extração de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} em KCl (1 mol L⁻¹) (MCLEAN *et al.*, 1958); teor disponível de K^+ e P extraídos com solução Mehlich-1 (MEHLICH, 1984); acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) por extrator acetado de cálcio e titulação com NaOH (VETTORI, 1969); matéria orgânica por oxidação com dicromato de potássio em solução sulfúrica (MEHLICH, 1934). A textura foi obtida pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986).

A saturação por Al (m) e a saturação por bases (V) foram calculadas pelas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$m(\%) = \frac{\text{Al}^{3+}}{\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Al}^{3+}} \quad (2)$$

$$V(\%) = \frac{\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}} \quad (3)$$

3.4 Análises com sensores próximos

3.4.1 Sensor portátil de raios-X (pXRF)

Todas as amostras foram analisadas por um pXRF modelo Delta Professional Olympus (MA, US). O equipamento possui um ânodo de prata e um tubo de raios-X de 4 W. As amostras foram

analisadas em triplicata usando o modo “*soil*”; 60 s cada leitura. A média das triplicatas foi utilizada nas análises.

O equipamento foi calibrado utilizando-se quatro amostras de referência certificadas pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST): SRM2710a, contendo elevado teor de elementos-traço; SRM711a, contendo teor moderado de elementos-traço; uma liga metálica 316; e uma amostra de SiO₂ puro.

3.4.2 Espectrômetro de refletância difusiva de luz visível e infravermelho (Vis-NIR)

Para as análises de Vis-NIR, as 120 amostras foram distribuídas em placas de Petri de modo homogêneo. Foi utilizado um espectroradiômetro FieldSpec 3 (Analytical Spectral Devices, ASD, Boulder, CO). O equipamento detecta entre as faixas 350 e 2500 nm, com resolução de 1 nm entre 350 e 700 nm, 3 nm entre 700 e 1400 nm e 10 nm entre 1400 e 2500 nm.

O sensor foi posicionado a 8 cm de distância das amostras. As mesmas foram iluminadas por duas lâmpadas de halogênio posicionadas a 35 cm (raios não colimados; ângulo zenital de 30°), com um ângulo de 90°entre si.

A cada 20 min uma placa branca de referência Spectralon foi utilizada para manter o equipamento calibrado durante as leituras. As amostras foram analisadas em duplicatas, rotacionando-se o sensor em 180°a cada repetição. Cada leitura única consistiu 100 scans em um período de 10 s cada.

Os dados foram exportados interpolando-se as leituras para 1 nm de resolução, resultando em um dado para cada nanômetro de espectro detectado, perfazendo 2.151 dados para cada espectro (350 a 2500 nm). As médias das duas repetições foram utilizadas nas análises posteriores.

Para uma melhor visualização dos dados, os espectros foram pré-processados utilizando-se a técnica de remoção do contínuo (CURCIO *et al.*, 2013). O método consiste em criar uma “casca” de referência em torno do espectro, a qual se atribui valor 1; depois, analisam-se as variações de cada banda em relação à nova referência.

3.5 Análises estatísticas e espaciais

Toda a manipulação e visualização de dados foi realizada através do ambiente R, do *software* QGIS e SAGA GIS (CONRAD *et al.*, 2015, QGIS, 2022, R CORE TEAM, 2022). Os pacotes utilizados para as análises foram: ‘tidyverse’ (WICKHAM *et al.*, 2019), ‘ggpubr’ (KASSAM-

BARA, 2020), ‘prospectr’ (STEVENS; RAMIREZ-LOPEZ, 2022), ‘scales’ (WICKHAM; SEIDEL, 2020) e ‘RColorBrewer’ (NEUWIRTH, 2014).

Os resultados das análises do pXRF foram espacializadas ao longo do perfil para obter-se a distribuição estimada de cada elemento em profundidade. O algoritmo utilizado para a espacialização foi o Multilevel B-Spline (CONRAD *et al.*, 2015).

A visualização em gráficos da variação dos elementos obtidos pelo pXRF, Vis-NIR, assim como de dados laboratoriais em função da profundidade foi calculada através da média de cada linha de pontos. Portanto, os resultados em cada profundidade (0, 15, 30, ..., 105 cm) consistem na média de 5 pontos (Figura 5).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

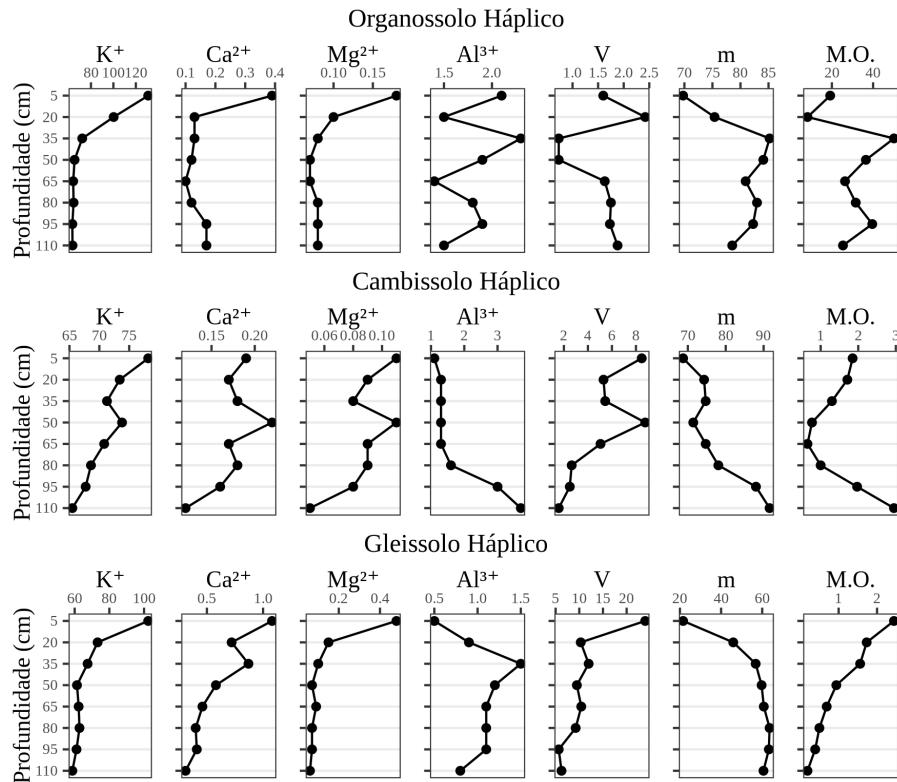
4.1 Caracterização química e física dos solos

4.1.1 Organossolo Háplico (OH)

Os resultados das análises químicas mostram clara mudança entre 5 e 35 cm, que corresponde ao manto depositado acima do solo (Figuras 5 e 6). No manto, houve um aumento notável no teor de elementos móveis como K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, que provavelmente foram depositados de regiões mais elevadas adjacentes. Essa mesma tendência foi demonstrada nos valores de saturação por bases (V) (Figura 6).

O teor de matéria orgânica, Al³⁺ e m seguiram tendência contrária. Foram menores nos horizontes superficiais e elevaram-se expressivamente ao atingirem o horizonte hístico (no OX e no CX). No OX, o teor de matéria orgânica foi elevado na superfície (~ 19%), devido à deposição recente da vegetação atual, apresentando valores menores em 20 cm de profundidade (~ 8%), com aumento significativo logo abaixo, em 35 cm de profundidade (~ 50%). O grande incremento de matéria orgânica em apenas 15 cm não é comumente encontrado em outros solos da mesma classe (SILVA NETO *et al.*, 2019, 2020, SOARES *et al.*, 2021). É possível indicação de antigo horizonte superficial recebedor de grande quantidade de matéria orgânica que fora posteriormente soterrado e protegido pelo manto que hoje recobre o solo.

Figura 6 – Resultados de análises químicas em função da profundidade em três perfis de solo com descontinuidade genética em Lavras, Minas Gerais, Brasil.

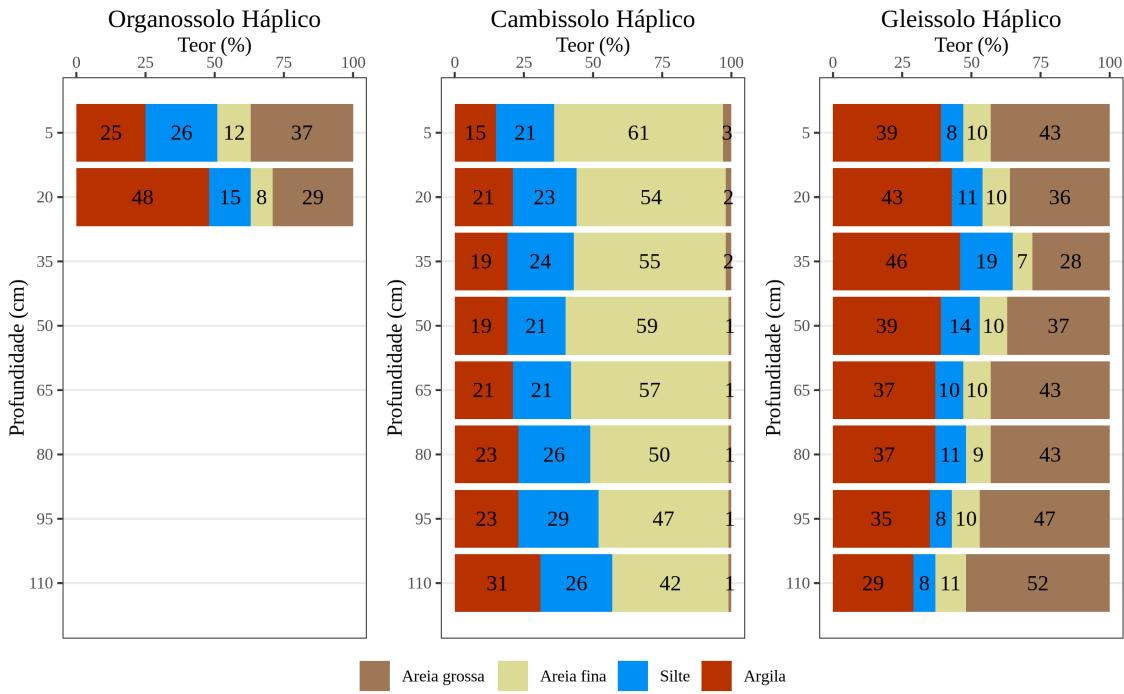


Fonte: Do autor (2022)

A textura do horizonte A do OX demonstra sua natureza argilosa (Figura 7). Os maiores teores de silte e areia no horizonte A são indicativos de material menos intemperizado em relação aos comumente encontrados na região (Latossolos e Argissolos). O alto teor de argila aos 20 cm (horizonte C), porém, é um indicativo de deposição de material argiloso de Latossolos e Argissolos em posição superior na paisagem, já que, pela espessura do manto, assume-se que este é recente, sendo difícil pensar em translocação de grande quantidade de argila.

A textura do manto superior ao OH demonstra sua natureza argilosa (Figura 7). Os maiores teores de silte e areia na superfície é indicativo de material menos intemperizado em relação aos comumente encontrados na região (Latossolos e Argissolos). O alto teor de argila aos 15 cm, porém, é um indicativo de deposição de material argiloso de Latossolos e Argissolos do entorno, já que pela espessura do manto assume-se que este é recente, sendo difícil pensar translocação de grande quantidade de argila.

Figura 7 – Variação de textura em função da profundidade em três solos com descontinuidade genética em Lavras, Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Do autor (2022)

4.1.2 Cambissolo Háplico (CH)

Similar ao OX, o maior teor de bases (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) em superfície indica um ambiente deposicional (Figura 6). Picos no teor de bases em 50 cm parecem indicar um acúmulo das bases depositadas, que são móveis no solo, especialmente em material arenoso.

O teor de Al^{3+} , elemento menos móvel no solo, sofreu mudança brusca abaixo de 65 cm, coincidindo com o horizonte genético enterrado observado no perfil (Figura 5). O mesmo ocorreu com o teor de matéria orgânica, elevando-se no horizonte A soterrado.

Os teores de silte e argila aumentaram abaixo de 65 cm (Figura 7) e podem favorecer o acúmulo de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} observado, já que o solo fica gradualmente menos arenoso, podendo diminuir a velocidade de translocação dos elementos.

4.1.3 Gleissolo Háplico (GH)

Assim como nos demais solos, os teores de bases indicaram deposição destes elementos móveis na superfície (Figura 6). O teor de matéria orgânica foi maior na superfície e decresceu gradualmente, contudo parece haver um segundo patamar entre 20 e 35 cm, coincidindo com

horizonte de cor mais escura abaixo do manto depositado acima do solo (Figura 5). Uma possível interpretação para tal tendência é o soterramento do antigo horizonte A do GX, que ainda preserva maior teor de matéria orgânica.

O teor de Al³⁺ mostrou uma brusca mudança entre o material recente depositado e os horizontes Ab e Cgb que ocorrem a partir dos 35 cm de profundidade (Figura 6). A textura parece acompanhar a mesma tendência, atingindo maiores valores de argila e menores valores de areia grossa em 35 cm; a tendência foi revertida abaixo de 35 cm: argila diminuiu e areia grossa aumenta.

Similar ao CX, há influência do material depositado, que possui maiores teores de argila e, possivelmente, óxidos de ferro (goethita) pela coloração mais amarelada no horizonte C (Figura 5). Solos comuns na região incluem Latossolos e Argissolos derivados de granito-gnaisse, que geralmente possuem elevados teores de Fe decorrente dos processos pedogenéticos, o que corrobora com a hipótese do material depositado na superfície do perfil ser proveniente dos solos de cotas mais elevadas no entorno.

4.2 Perfil espectral nas faixas do visível e infravermelho

4.2.1 Organossolo Háplico (OH)

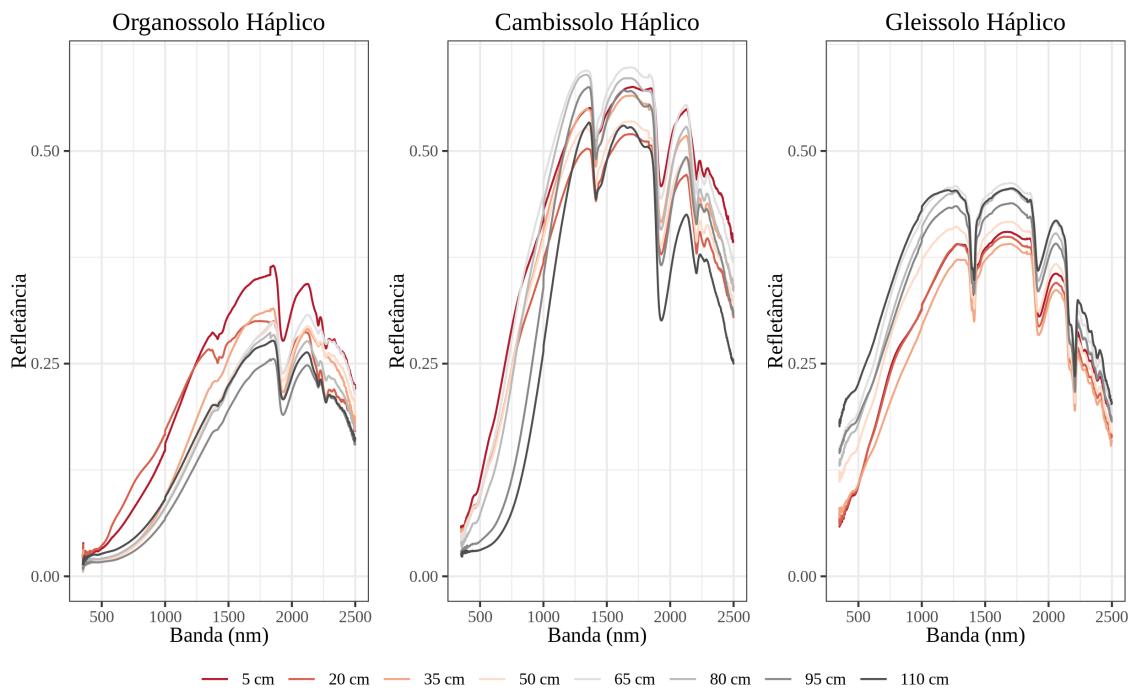
A intensidade de refletância do OX foi menor que a dos demais solos, não ultrapassando 0,375 (Figura 8). A cor escura conferida pela matéria orgânica ao solo diminui a refletância geral, resultando em espectros mais achatados, de menor refletância (BENEDET *et al.*, 2020, DEMATTÊ *et al.*, 2019). Fato também observado nas diferentes profundidades: na superfície, o espectro possuía maior refletância; em profundidade, no horizonte hístico, a refletância diminuiu (Figuras 5 e 8).

A remoção do contínuo discrimina melhor os picos de absorção (Figura 9). Entre 400 e 700 nm ocorre grande faixa de absorção abaixo de 35 cm (início do horizonte hístico), que diferiu dos espectros das profundidades 5 e 20 cm. Tal região do espectro é associada a cromóforos, grupos funcionais que conferem cor às moléculas (YANG *et al.*, 2019). Absorções nesta faixa são comumente relacionadas a óxidos de ferro e ácidos húmicos presentes na matéria orgânica (THOMAS *et al.*, 2022).

A remoção do contínuo discrimina melhor os picos de absorção (Figura 9). Entre 400 e 700 nm ocorre grande faixa de absorção abaixo de 30 cm (início do horizonte hístico), que as difere dos espectros das profundidades 0 e 15 cm. Tal região do espectro é associada a cromóforos,

grupos funcionais que conferem cor às moléculas (YANG *et al.*, 2019). Absorções nesta faixa são comumente relacionadas a óxidos de ferro e ácidos húmicos presentes na matéria orgânica (THOMAS *et al.*, 2022).

Figura 8 – Espectro visível e infravermelho obtido via sensor Vis-NIR em três solos com descontinuidade genética em Lavras, Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Do autor (2022)

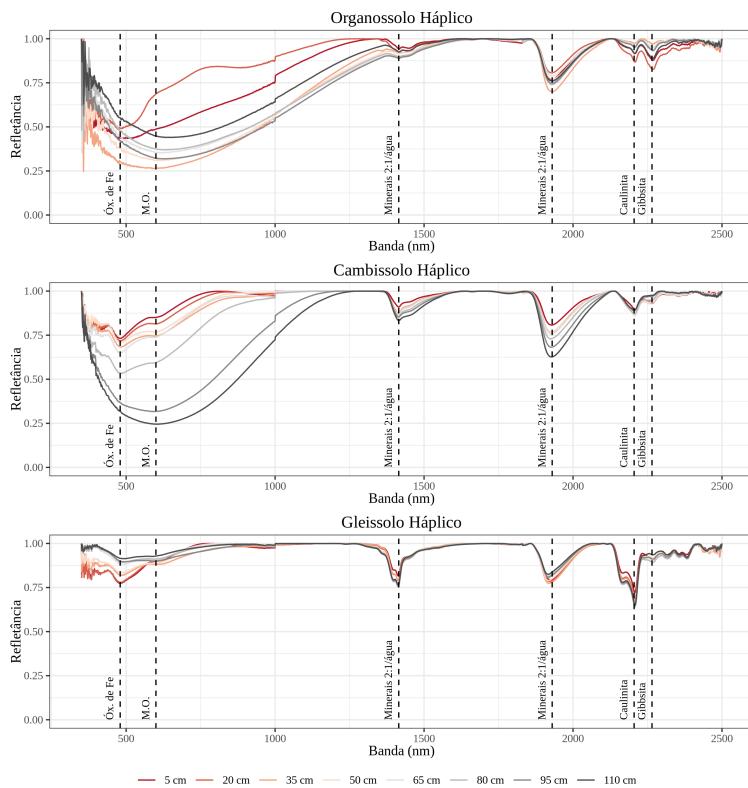
Picos de absorção em 480 nm, mais realçados nas profundidades próximas a 5 e 20 cm estão associados à goethita (FANG *et al.*, 2018), óxido de ferro comum em Latossolos e Argissolos derivados de granito-gnaisse, muito presentes no entorno do OX. Picos em 480 nm e grande absorção geral entre 500 e 700 cm no manto superficial (até aproximadamente 20 cm) parece indicar deposição de material destes solos (Figura 9).

Traços de absorção em 2.268 nm indicam presença de gibbsita (BENEDET *et al.*, 2022, DEMATTÊ *et al.*, 2019), óxido de alumínio presente em solos muito intemperizados. É possível identificar um grande pico nesta banda na profundidade 20 cm, onde encontra-se o manto depositado mais avermelhado (Figuras 5 e 9). Esses resultados apresentam mais um indicativo de que a origem do material depositado foi um Latossolo ou Argissolo nos arredores de OX.

Traços de absorção em 2268 nm indicam presença de gibbsita, óxido de alumínio presente em solos muito intemperizados. É possível identificar um grande pico nesta banda na profundidade 15 cm, onde encontra-se o manto depositado mais avermelhado (Figuras 5 e 9). É mais um

indicativo de que a origem do material depositado é um Latossolo ou Argissolo nos arredores de OH.

Figura 9 – Remoção do contínuo do espectro visível e infravermelho obtido via sensor Vis-NIR em três solos com descontinuidade genética em Lavras, Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Do autor (2022)

4.2.2 Cambissolo Háplico (CH)

Os picos de refletância de CX foram maiores que os demais solos (Figura \ref{fig:visnir}). Sendo derivado de sedimentos provenientes de quartzito, o CX é rico em quartzo, mineral resistente ao intemperismo e predominante na fração areia de solos brasileiros [KÄMPF; MARQUES; CURI (2012); SILVA20181]. O quartzo causa efeito contrário ao da matéria orgânica: confere coloração clara ao solo, resultando em espectros com maiores valores de refletância (BENEDET *et al.*, 2020).

A remoção do contínuo deixa evidente as diferenças espetrais da horizontes genéticos enterrados (Figura 9). A porção de cor clara acima de 65 cm possui refletância maior em relação ao horizonte hístico. A faixa entre 400 e 700 nm, que evidencia compostos orgânicos (DEMATTÉ *et al.*, 2017), possui grande pico de absorção nas profundidades 95 e 110 cm, onde encontra-se o horizonte Ab, que possui expressiva elevação no teor de matéria orgânica (Figuras 5 e 6).

Os picos de absorção em 1.450 e 1.930 nm indicam a presença de grupos O-H (SHI *et al.*, 2013), o que corrobora com a mudança de textura observada, indicando uma mudança mineralógica em Ab (Figura 7). Os picos em 1.930 nm aumentam gradativamente com a profundidade, destacando a mudança de material observada no perfil.

4.2.3 Gleissolo Háplico (GH)

Há uma segregação facilmente perceptível entre os espectros de maiores profundidades (\$>\$65 cm) e os de amostras mais superficiais (Figuras 8). O material gleizado (horizonte Cg), mais claro, possui maiores valores de refletância, similar ao efeito do quartzo que confere cor clara ao solo. Isso difere a intensidade da refletância daquela do manto depositado (horizontes A e C), que possui maior pigmentação, dos demais horizontes abaixo.

Os espectros após remoção do contínuo demonstram feições bem diferentes comparados ao OX e CX (Figura 9). As longas faixas de absorção entre 480 e 700 nm, indicativos de matéria orgânica e óxidos de ferro, não estão presentes, resultante, no caso dos óxidos de ferro, da redução desses minerais e sua consequente destruição em ambientes de redução típicos de GX. Comparativamente, picos de absorção em 1.400 nm e 2.027 nm são mais acentuados e indicam presença, respectivamente, de grupos O-H associados a argilominerais 2:1 e caulinita (BENEDET *et al.*, 2022, DEMATTÉ *et al.*, 2019). É sinal de diferença mineralógica entre este e os demais solos, que não apresentaram absorção tão expressiva nestas faixas do espectro.

Como nos solos analisados anteriormente, os dados espectrais discriminaram bem o manto depositado e solo subjacente. Amostras em menores profundidades (até 50 cm) possuem maiores picos de absorção em 480 nm, indicando maior presença de óxidos de ferro (FANG *et al.*, 2018), como pode ser observado pelas cores avermelhadas nos perfis (Figura 5). Paralelamente, possuem menor absorção em 1.400 e 2.027 nm, indicando menor quantidade de minerais 2:1 e caulinita, i.e., um material mais intemperizado. Mais uma vez, isso corrobora com a hipótese de deposição de sedimentos de solos mais intemperizados no entorno dos perfis estudados.

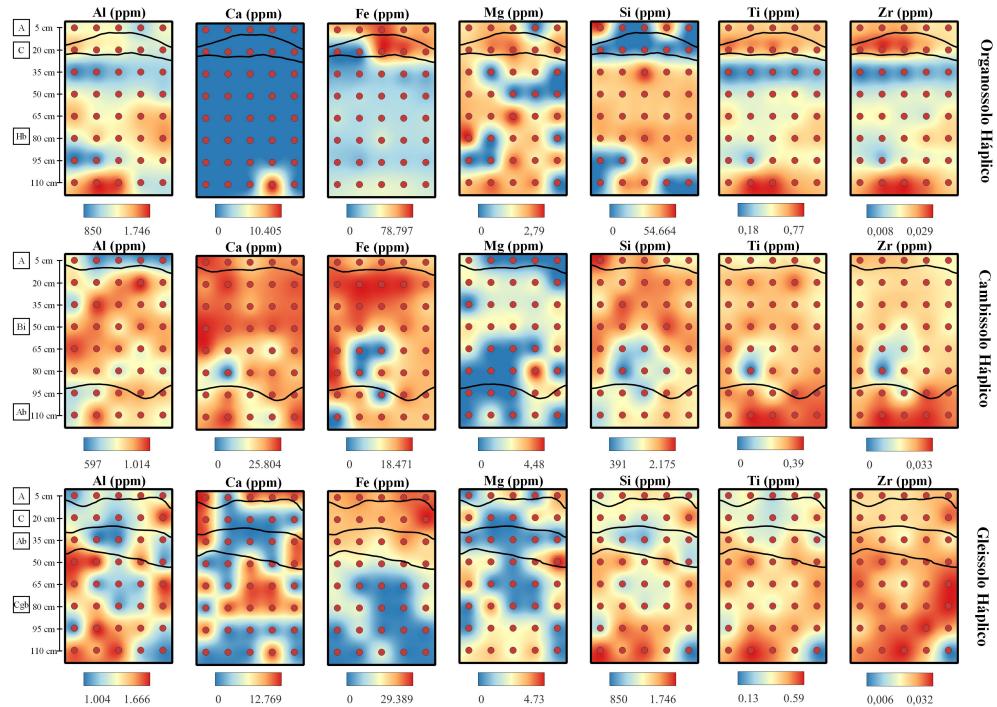
4.3 Teores elementais obtidos via pXRF

4.3.1 Organossolo Háplico (OH)

A distribuição do teor de elementos fornecida pelo pXRF mostrou faixas muito distintas de concentrações entre 5 e 20 cm e o restante do perfil (Figura 10). A descontinuidade entre o horizonte C e Hb fica evidente. O maior teor de Fe e menor teor de Si no manto sobrejacente

fortalecem a hipótese de que os sedimentos se originaram de solos muito intemperizados como Latossolos e Argissolos. Valores elevados de Si demonstram a baixa intensidade de intemperismo nas condições favoráveis para a formação do horizonte Hb. O Si, elemento móvel, já teria sido lixiviado em grande parte em condições de alto grau de intemperismo.

Figura 10 – Espacialização dos teores elementais obtidos via sensor pXRF ao longo dos perfis de três solos com descontinuidade genética em Lavras, Minas Gerais, Brasil.

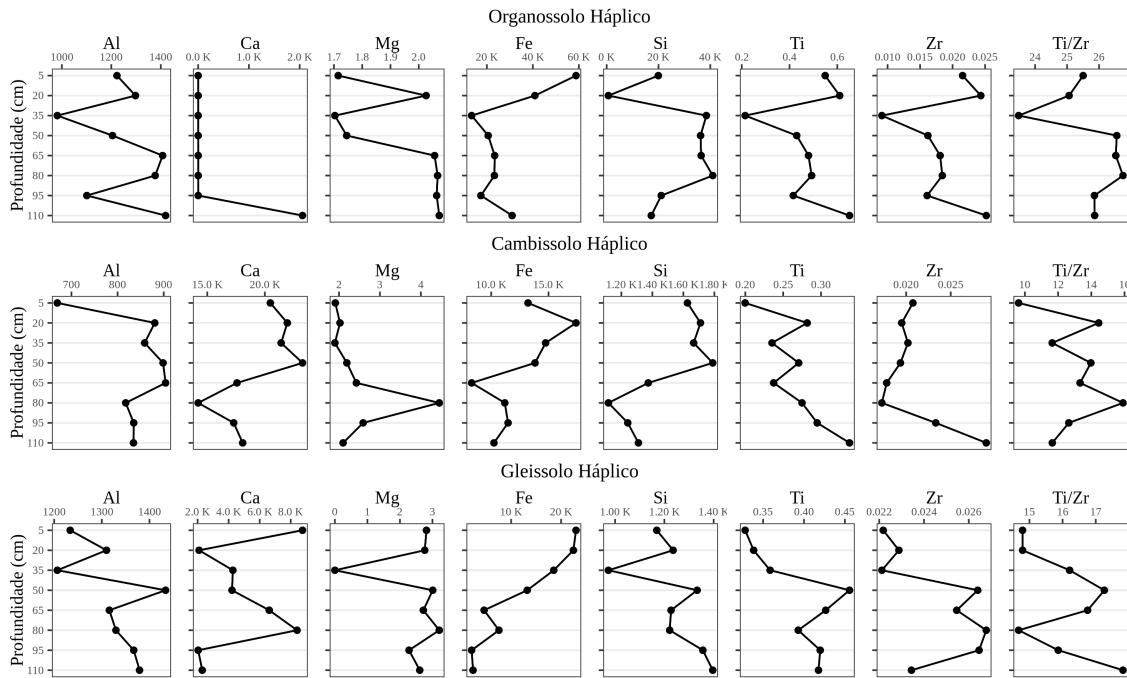


Fonte: Do autor (2022)

Além do que é visível no perfil, próximo aos 110 cm de profundidade, nota-se uma nova descontinuidade (Figura 10). Maior teor de Al, Mg, Ti e Zr, e menor teor de Si indicando uma alteração química no perfil.

A variação das concentrações em profundidade deixa clara esta descontinuidade química (Figura \ref{fig:pxrf_depth}). A razão Ti/Zr é muito utilizada para identificar descontinuidades litológicas devido à imobilidade dos respectivos elementos e sua comum ocorrência em materiais de origem distintos. Aqui, o índice Ti/Zr diferencia três zonas: o manto superficial depositado entre 5 e 20 cm, o horizonte Hb até 80 cm e uma alteração no horizonte Hb abaixo de 95 cm, possivelmente indicando diferente composição da matéria orgânica abaixo deste ponto.

Figura 11 – Variação dos teores elementais e do índice Ti/Zr em função profundidade obtidos via sensor pXRF ao longo dos perfis de três solos com descontinuidade genética em Lavras, Minas Gerais, Brasil. Valores em ppm. K = 1.000.



Fonte: Do autor (2022)

4.3.2 Cambissolo Háplico (CH)

Os elementos que melhor identificam a descontinuidade entre horizontes em CX foram o Fe, Si, Ti e Zr (Figura 10). O alto teor de Si entre a superfície e o Ab foi reflexo do material de origem –quartzito– no qual predomina o quartzo (SiO_2). A acumulação de elementos móveis próximo a 80 cm de profundidade (Figura 11), como citado anteriormente, pode ser devido à mudança de textura entre Bi e Ab (Figura 7). Ao aumentar o teor de argila e silte, diminui-se o tamanho dos poros e consequentemente a condutividade hidráulica do solo, reduzindo a movimentação de água e dos elementos.

A razão Ti/Zr foi pequena próximo à superfície, maior ao longo do perfil, e volta a decrescer em Ab (Figura 11). O Fe e Si também mostraram tendência diferente após a descontinuidade entre horizontes, apresentando menores teores, indicativo de um material distinto.

4.3.3 Gleissolo Háplico (GH)

Como nos demais solos, a descontinuidade entre horizontes foi facilmente percebida ao se observarem as concentrações dos elementos (Figura 10). Valores de Si, Ti e Zr foram menores no manto

sobrejacente, e elevaram-se em profundidade.

Os dados espectrais mostraram maiores picos de absorção de óxidos de ferro próximo à superfície, distintos das amostras de maiores profundidades (Figura 9). Os dados de pXRF corroboraram com tal observação. Valores de Fe no manto acima, de cor amarelada, foram expressivamente maiores comparados àqueles do horizonte Cgb (Figuras 5 e 10).

Assim como em OX e CX, há mais uma descontinuidade em GX abaixo de 80 cm profundidade (Figura 11). O índice Ti/Zr distinguiu o material depositado (A e C) do horizonte glei (Cgb) e também identificou um material diferente abaixo de 80 cm. É possível haver relação entre tal tendência e uma mancha mais acinzentada observada na parte inferior do perfil (Figura 5). Na mesma região, aumentaram os teores de Al, Mg, Si e Ti, indicando um material distinto (Figura 10).

5 CONCLUSÕES

Os dados fornecidos pelos sensores pXRF e Vis-NIR foram compatíveis com os resultados laboratoriais tradicionais. Permitiram a extensão das interpretações para além das análises de rotina de solos brasileiros e possibilitaram inferências sobre a mineralogia e a distribuição espacial dos constituintes dos solos.

Ambos os sensores demonstraram que os mantos depositados acima de OX e GX apresentaram alto teor de Fe, sugerindo que a origem dos sedimentos depositados foram solos muito intemperizados com acúmulo residual de óxidos de Fe, como Latossolos e Argissolos, comuns na região.

Nos perfis OX e CX, os traços espectrais permitiram não apenas a separação do manto sobrejacente, mas também a estratificação dos horizontes, indicando diferenças ao longo do horizonte hístico de OX e claro horizonte de transição entre os horizontes Bi e Ab no perfil CX.

Os resultados espacializados do pXRF auxiliaram na compreensão da distribuição espacial das variações em profundidade detectadas pelos espectros, assim como ajudaram a confirmar os traços mineralógicos neles observados. Os três perfis apresentaram concentrações químicas díspares entre seus horizontes genéticos enterrados e o restante dos perfis. Adicionalmente, fora possível identificar alteração nos teores de Ti e Zr, elementos muito estáveis no solo, na profundidade próxima aos 110 cm nos três perfis, indicativo de descontinuidade litológica.

A principal vantagem do uso de sensores reside em tornar possível a análise de grande número de amostras. Em situações corriqueiras, análises convencionais de 40 amostras por perfis

de 1 m seriam economicamente inviáveis. Com sensores próximos, o custo limita-se à aquisição do equipamento, sendo as análises fáceis e rápidas, permitindo grande aumento na quantidade e densidade de informações sem elevação exagerada de custo.

Aqui, a combinação de análises tradicionais e sensores próximos potencializou o poder de interpretação do pedólogo, viabilizando uma análise mais detalhada das variações em profundidade dos solos, corpos extremamente heterogêneos e descontínuos, cuja variação possui consequências práticas em seus usos.

REFERÊNCIAS

- ADAMCHUK, V. I., HUMMEL, J. W., MORGAN, M. T., *et al.* On-the-go soil sensors for precision agriculture, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71–91, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>.
- ALEXANDROVSKIY, A. L., GLASKO, M. P., KRENKE, N. A., *et al.* Buried soils of flood-plains and paleoenvironmental changes in the Holocene, **Revista Mexicana de Ciencias Geológicas**, v. 21, n. 1, p. 9–17, 2004.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil, **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ANDRADE, R., FARIA, W. M., SILVA, S. H. G., *et al.* Prediction of soil fertility via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry and soil texture in the Brazilian Coastal Plains, **Geoderma**, v. 357, p. 113960, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113960>.
- ASF DAAC. **Alos Palsar radiometric terrain corrected high-res (AP 26358 FBS F6750 RT1)**. Includes material from JAXA/METI (2007), NASA, 2015.
- ASHTEKAR, J. M., OWENS, P. R. Remembering knowledge: An expert knowledge based approach to digital soil mapping, **Soil Horizons**, v. 54, n. 5, p. 1–6, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2136/sh13-01-0007>.
- BENEDET, L., FARIA, W. M., SILVA, S. H. G., *et al.* Soil texture prediction using portable X-ray fluorescence spectrometry and visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy, **Geoderma**, v. 376, p. 114553, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114553>.
- BENEDET, L., SILVA, S. H. G., MANCINI, M., *et al.* Variation of properties of two contrasting Oxisols enhanced by pXRF and Vis-NIR, **Journal of South American Earth Sciences**, v. 115, p. 103748, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103748>.
- BHATTACHARYA, R. K., CHATTERJEE, N. D., ACHARYA, P. Morphometric analysis to characterize the soil erosion susceptibility in the western part of lower Gangetic River basin, India, **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, p. 501, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06819-8>.
- BIANCHINI, G., ACCORSI, C. A., CREMONINI, S., *et al.* Late Glacial and Holocene buried black soils in Emilia (northern Italy): genetic and paleoenvironmental insights, **Journal of Soils and Sediments**, v. 22, n. 2, p. 409–428, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03088-6>.

COBLINSKI, J. A., INDA, A. V., DEMATTE, J. A. M., *et al.* Identification of minerals in subtropical soils with different textural classes by VIS-NIR-SWIR reflectance spectroscopy, **Catena**, v. 203, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105334>.

CONDIT, H. R. The spectral reflectance of american soils, **Photogrammetric Engineering**, v. 36, n. 9, p. 955–966, 1970.

CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., *et al.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 7, p. 1991–2007, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/8/1991/2015/>.

CORRADINI, F., BARTHOLOMEUS, H., LWANGA, E. H., *et al.* Predicting soil microplastic concentration using vis-NIR spectroscopy, **Science of The Total Environment**, v. 650, p. 922–932, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.101>.

CURCIO, D., CIRAOLO, G., D'ASARO, F., *et al.* Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy, **Procedia Environmental Sciences**, v. 19, p. 494–503, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.056>.

CURI, N., SILVA, H. G. S., POGGERE, G. C., *et al.* **Mapeamento de solos e magnétismo no campus da UFLA como traçadores ambientais**. Lavras, UFLA, 2017.

DEMATTÊ, J. A. M., DOTTO, A. C., PAIVA, A. F. S., *et al.* The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges, **Geoderma**, v. 354, p. 113793, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043>.

DEMATTÊ, J. A. M., HORÁK-TERRA, I., BEIRIGO, R. M., *et al.* Genesis and properties of wetland soils by VIS-NIR-SWIR as a technique for environmental monitoring, **Journal of Environmental Management**, v. 197, p. 50–62, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.014>.

DHARUMARAJAN, S., HEGDE, R., JANANI, N., *et al.* The need for digital soil mapping in India, **Geoderma Regional**, v. 16, p. e00204, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00204>.

FANG, Q., HONG, H., ZHAO, L., *et al.* Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy for Investigating Soil Mineralogy: A Review, **Journal of Spectroscopy**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3168974>.

FARIA, A. J. G., SILVA, S. H. G., MELO, L. C. A., *et al.* Soils of the Brazilian Coastal Plains biome: prediction of chemical attributes via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry and robust prediction models, **Soil Research**, v. 58, n. 7, p. 683–695, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10713-020-00937-1>.

//doi.org/10.1071/SR20136.

GE, Y., THOMASSON, A., SUI, R. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review, **Frontiers of Earth Science**, v. 5, p. 229–238, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0>.

GEE, G. W., BAUDER, J. W., Particle-size Analysis. **Methods of Soil Analysis**, [S.l.], John Wiley & Sons, Ltd, 1986. p. 383–411. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>.

GLANZMAN, R., CLOSS, G., Field Portable X-Ray Fluorescence Geochemical Analysis - Its Contribution to Onsite Real-time Project Analysis. In: MILKEREIT, B. (Org.), **Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration**, [S.l.], Advances in Prospect-Scale Geochemical Methods, 2007. p. 291–301.

HARTEMINK, A. E., KRASILNIKOV, P., BOCKHEIM, J. G. Soil maps of the world, **Geoderma**, v. 207-208, p. 256–267, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.003>.

HARTEMINK, A. E., MINASNY, B. Towards digital soil morphometrics, **Geoderma**, v. 230-231, p. 305–317, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.008>.

HORTA, A., MALONE, B., STOCKMANN, U., *et al.* Potential of integrated field spectroscopy and spatial analysis for enhanced assessment of soil contamination: A prospective review, **Geoderma**, v. 241-242, p. 180–209, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.024>.

JENNY, H. **Factors of soil formation : a system of quantitative pedology**. New York, McGraw-Hill, 1941.

KALNICKY, D. J., SINGHVI, R. Field portable XRF analysis of environmental samples, **Journal of Hazardous Materials**, v. 83, n. 1, p. 93–122, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00330-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00330-7).

KÄMPF, N., MARQUES, J. J., CURI, N., Mineralogia de Solos Brasileiros. **Pedologia Fundamentos**, [S.l.], UFLA, 2012. p. 81–146.

KASSAMBARA, A. **ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots**. [S.l: s.n.], 2020. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>.

LAMICHHANE, S., KUMAR, L., ADHIKARI, K. Updating the national soil map of Nepal through digital soil mapping, **Geoderma**, v. 394, p. 115041, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115041>.

LEMIÈRE, B. A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied

geochemistry, **Journal of Geochemical Exploration**, v. 188, p. 350–363, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.006>.

MANCINI, M., SILVA, S. H. G., HARTEMINK, A. E., *et al.* Formation and variation of a 4.5 m deep Oxisol in southeastern Brazil, **catena**, v. 206, p. 105492, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105492>.

MANCINI, M., WEINDORF, D. C., CHAKRABORTY, S., *et al.* Tracing tropical soil parent material analysis via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazilian Cerrado, **Geoderma**, v. 337, p. 718–728, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.026>.

MANCINI, M., WEINDORF, D. C., SILVA, S. H. G., *et al.* Parent material distribution mapping from tropical soils data via machine learning and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazil, **Geoderma**, v. 354, p. 113885, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113885>.

MCBRATNEY, A. B., SANTOS, M. L. M., MINASNY, B. On digital soil mapping, **Geoderma**, v. 117, n. 1, p. 3–52, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).

MCLEAN, E. O., HEDDLESON, M. R., BARTLETT, R. J., *et al.* Aluminum in Soils: I. Extraction Methods and Magnitudes in Clays and Ohio Soils, **Soil Science Society of America Journal**, v. 22, n. 5, p. 382–387, 1958. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200050005x>.

MEHLICH, A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method, **Soil Science**, v. 37, p. 29–38, 1934. DOI: <http://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.

MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, n. 12, p. 1409–1416, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>.

MEIER, H. A., DRIESE, S. G., NORDT, L. C., *et al.* Interpretation of Late Quaternary climate and landscape variability based upon buried soil macro- and micromorphology, geochemistry, and stable isotopes of soil organic matter, Owl Creek, central Texas, USA, **Catena**, v. 114, p. 157–168, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.019>.

MENEZES, J. P., FRANCO, C., COUTINHO DE OLIVEIRA, L., *et al.* Morfometria e evolução do uso do solo e da vazão de máxima em uma micro bacia urbana, **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, p. 659–672, 2014. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i4.597>.

MITUSOV, A. V., MITUSOVA, O. E., PUSTOVOYTOV, K., *et al.* Palaeoclimatic indicators in soils buried under archaeological monuments in the Eurasian steppe: a review, **The Holocene**, v. 19, n. 8, p. 1153–1160, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1177/0959683609345076>.

MOHAMMED, A. K., HIRMAS, D. R., GIMÉNEZ, D., *et al.* A digital morphometric approach for quantifying ped shape, **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 6, p. 1604–1618, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.06.0203>.

NEUWIRTH, E. **RColorBrewer: ColorBrewer Palettes**. [S.l: s.n.], 2014. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer>.

PIETSCH, D., KUEHN, P. Buried soils in the context of geoarchaeological research-two examples from Germany and Ethiopia, **Archaeological and Anthropological Sciences**, v. 9, p. 1571–1583, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12520-014-0180-9>.

QGIS. **QGIS Geographic Information System**. [S.l.], QGIS Association, 2022. Disponível em: <https://www.qgis.org>.

R CORE TEAM. **R, a language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing, 2022. Disponível em: <https://www.r-project.org>.

RIBEIRO, B. T., SILVA, S. H. G., SILVA, E. A., *et al.* Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science, **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 3, p. 245–254, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542017413000117>.

RIVIECCIO, R., BENE, C. D., PAOLANTI, M., *et al.* Soil rooting depth of Italy, **Journal of Maps**, v. 16, n. 2, p. 36–42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1690595>.

ROUILLON, M., TAYLOR, M. P. Can field portable X-ray fluorescence (pXRF) produce high quality data for application in environmental contamination research?, **Environmental Pollution**, v. 214, p. 255–264, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.055>.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, Embrapa Solos, 2018.

SHI, T., CUI, L., WANG, J., *et al.* Comparison of multivariate methods for estimating soil total nitrogen with visible/near-infrared spectroscopy, **Plant and Soil**, v. 366, n. 1-2, p. 363–375, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1436-8>.

SILVA NETO, E. C. da, PEREIRA, M. G., ANJOS, L. H. C. dos, *et al.* Phytoliths as paleopedological records of an histosol-cambisol-ferralsol sequence in Southeastern Brazil, **Catena**, v. 193, p. 104642, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104642>.

SILVA NETO, E. C. da, PEREIRA, M. G., ARAUJO CARVALHO, M. de, *et al.* Palaeoenvironmental records of Histosol pedogenesis in upland area, Espírito Santo State (SE, Brazil), **Journal of South American Earth Sciences**, v. 95, p. 102301, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102301>.

SILVA, S. H. G., HARTEMINK, A. E., SANTOS TEIXEIRA, A. F. dos, *et al.* Soil weathering analysis using a portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometer in an Inceptisol from the Brazilian Cerrado, **Applied Clay Science**, v. 162, p. 27–37, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.05.028>.

SILVA, S. H. G., RIBEIRO, B. T., GUERRA, M. B. B., *et al.*, Chapter One - pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. In: SPARKS, D. L. (Org.), Advances em Agronomia. [S.l.], Academic Press, 2021. v. 167. p. 1–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.12.001>.

SMITH, G. D. **The Guy Smith interviews: rationale for concepts in Soil Taxonomy**. Technical Monograph No. 11, Washington, DC, Soil Management Support Services, 1986.

SOARES, P. F. C., SILVA, R. C., SILVA NETO, E. C., *et al.* Histosol pedogenesis in floodplain coastal environments in the state of Rio de Janeiro, Brazil, **Catena**, v. 207, p. 105612, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105612>.

STEVENS, A., RAMIREZ-LOPEZ, L. **An introduction to the prospectr package**. [S.l: s.n.], 2022.

STOCKMANN, U., CATTLE, S. R., MINASNY, B., *et al.* Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis, **Catena**, v. 139, p. 220–231, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.007>.

TERRA, F. S., DEMATTÊ, J. A. M., VISCARRA ROSSEL, R. A. Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis, **Geoderma**, v. 318, p. 123–136, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.053>.

THOMAS, F., PETZOLD, R., LANDMARK, S., *et al.* Estimating Forest Soil Properties for Humus Assessment—Is Vis-NIR the Way to Go?, **Remote Sensing**, v. 14, n. 6, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14061368>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/6/1368>.

USDA. Buried Soils and Their Effect on Taxonomic Classification. National Soil Survey Center, Lincoln, NE, US Department of Agriculture, 2010.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Technical report 7, Escritório de Pedologia e Fertilidade de Solos, 1969.

WANZEK, T., KEILUWEIT, M., BAHAM, J., *et al.* Quantifying biogeochemical heterogeneity in soil systems, **Geoderma**, v. 324, p. 89–97, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.003>.

WICKHAM, H., AVERICK, M., BRYAN, J., *et al.* Welcome to the tidyverse, **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.01686>.

WICKHAM, H., SEIDEL, D. **scales: Scale Functions for Visualization.** [S.l: s.n.], 2020. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=scales>.

YANG, M., XU, D., CHEN, S., *et al.* Evaluation of Machine Learning Approaches to Predict Soil Organic Matter and pH Using vis-NIR Spectra, **Sensors**, v. 19, n. 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19020263>.

YOUNG, CRAWFORD, J. W. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex, **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1634–1637, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1097394>.

YOUNG, CRAWFORD, J. W., RAPPOLDT, C. New methods and models for characterising structural heterogeneity of soil, **Soil and Tillage Research**, v. 61, n. 1, p. 33–45, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00188-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00188-X).

YOUNG, EVANS, C. A., HODGES, K. V., *et al.* A review of the handheld X-ray fluorescence spectrometer as a tool for field geologic investigations on Earth and in planetary surface exploration, **Applied Geochemistry**, v. 72, p. 77–87, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.07.003>.

ZHANG, Y., HARTEMINK, A. E. Data fusion of vis-NIR and PXRF spectra to predict soil physical and chemical properties, **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 3, p. 316–333, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12875>.

ZHAO, L., HONG, H., LIU, J., *et al.* Assessing the utility of visible-to-shortwave infrared reflectance spectroscopy for analysis of soil weathering intensity and paleoclimate reconstruction, **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 512, p. 80–94, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.07.007>.