



WELLINGTON DE LIMA

**IDENTIFICAÇÃO DA ORIGEM DE SEDIMENTOS DE
EROSÃO UTILIZANDO SENSORES PROXIMAIS**

LAVRAS – MG

2021

WELLINGTON DE LIMA

**IDENTIFICAÇÃO DA ORIGEM DE SEDIMENTOS DE EROSÃO UTILIZANDO
SENSORES PROXIMAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação do Departamento de Ciência do Solo, área de concentração Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de mestre.

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi
Orientador

Prof. Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva e Prof. Dr. Nilton Curi
Coorientadores

LAVRAS - MG

2021

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Lima, Wellington de.

Identificação de origem de sedimentos de erosão utilizando
sensores proximais / Wellington de Lima. - 2021.

62 p. : il.

Orientador(a): Junior Cesar Avanzi.

Coorientador(a): Sérgio Henrique Godinho Silva, Nilton Curi.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Erosão. 2. Sensores proximais. 3. Fingerprinting. I. Avanzi,
Junior Cesar. II. Silva, Sérgio Henrique Godinho. III. Curi, Nilton.
IV. Título.

WELLINGTON DE LIMA

**IDENTIFICAÇÃO DA ORIGEM DE SEDIMENTOS DE EROSÃO UTILIZANDO
SENSORES PROXIMAIS**

**IDENTIFICATION OF THE ORIGIN OF EROSION SEDIMENTS USING
PROXIMAL SENSORS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação do Departamento de Ciência do Solo, área de concentração Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de mestre.

APROVADA em 31 de agosto de 2021.

Dr. Junior Cesar Avanzi - UFLA

Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva - UFLA

Dr. Julierme Zimmer Barbosa – IFSudesteMG

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi
Orientador

Prof. Sérgio Henrique Godinho Silva e Prof. Dr. Nilton Curi
Coorientadores

LAVRAS - MG

2021

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, universidade PÚBLICA, GRATUITA e de QUALIDADE.

À CNPq e FAPEMIG, por financiar pesquisas no Brasil.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Departamento de Ciência do Solo, por disponibilizar a infraestrutura necessária ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e orientadores, Dr. Junior Cesar Avanzi, Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva e Dr. Nilton Curi, pela confiança depositada.

Aos colegas do DCS, pelo apoio e companhia.

À Duda, minha namorada, que tanto amo e admiro.

Agradeço.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A erosão é uma das principais causas de degradação do solo e conhecer a origem dos sedimentos e os processos que agravam o problema é um dos objetivos da conservação do solo. Assim, diferentes sensores têm contribuído para o avanço nessas pesquisas, possibilitando a determinação da origem de sedimentos, por exemplo, em bacias hidrográficas, unidades fundamentais na conservação do meio ambiente. Os objetivos deste trabalho foram identificar a origem dos sedimentos depositados em área de várzea utilizando a abordagem do *fingerprinting*, e avaliar dois sensores proximais na identificação das fontes de sedimentos: o espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (pXRF) e o suscetibilímetro. A seleção das variáveis traçadoras nos sedimentos, preconizada pela abordagem do *fingerprinting*, baseou-se no conhecimento pedológico, sendo selecionados os elementos Fe, Si, Al, Ti e Zr. A área de contribuição de sedimentos é constituída de dois materiais de origem contrastantes –gabro e granito-gnaiss–, sobre os quais se desenvolveram um Latossolo Vermelho Distroférico típico (LV) e um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVA), respectivamente. Na área de contribuição de sedimentos, coletaram-se 35 amostras na camada superficial do solo (0-2 cm), em malha regular de 50 metros. Já na área de deposição, coletaram-se 24 amostras, em malha regular de 7 metros. A determinação das fontes de sedimentos foi realizada por meio de variáveis topográficas e pela análise estatística de cluster –um algoritmo que classifica objetos em grupos (cluster) de acordo com a similaridade e diferença entre eles. Mapas de relevo e de fluxo acumulado foram confeccionados a partir do modelo digital de elevação (MDE) gerados a partir de curvas de nível de 1 metro. A análise de variáveis topográficas e a análise de cluster indicaram que o PVA –o solo mais suscetível à erosão na sub-bacia–, foi o que mais contribuiu como fonte de sedimentos. O pXRF foi mais eficiente na detecção das fontes de sedimentos quando comparado ao suscetibilímetro. Os resultados apontam para a eficiência e praticidade do uso de sensores proximais na identificação de fonte de sedimentos em bacias com pequenas áreas. Além disso, essas técnicas reforçam a importância de adoção de práticas conservacionistas em solos que se encontram em terrenos acidentados, em especial nos solos mais suscetíveis à erosão, visando monitorar, prever e controlar os fatores antrópicos causadores da erosão hídrica em escala de bacias.

Palavras-chave: Suscetibilidade magnética. Fluorescência de raios-X. Conservação do solo. *Fingerprinting*.

ABSTRACT

Erosion is one of the main causes of soil degradation and knowing the origin of sediments and the processes that aggravate the problem is one of the objectives of soil conservation. Thus, different sensors have contributed to the research advances, enabling the determination of the source of sediments, for example, in the catchment, fundamental units in the environmental conservation. The objectives of this work were to identify the source of deposited sediments in a floodplain applying fingerprinting approach, and to evaluate two proximal sensors to identify sediment sources: the portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF) and the susceptibility meter. The selection of tracer variables in the sediment, recommended by the fingerprinting approach, was based on pedological knowledge, being selected the elements Fe, Si, Al, Ti and Zr. The sediment contribution area consists of two contrasting parent materials – gabbro, and granite-gneiss–, on which a typical Red Dystrophic Latosol (LV) and a typical Red-Yellow Dystrophic Argisol (PVA) developed, respectively. In the sediment contribution area, 35 samples were collected in the soil surface layer (0-2 cm), in a regular grid of 50 meters. In the deposition area, 24 samples were collected, in a regular 7-meter mesh. The determination of sediment sources was carried out through topographic variables and cluster statistical analysis –an algorithm that classifies objects into groups (cluster) according to the similarity and difference between them. The relief and accumulated flux maps were made from a digital elevation model (DEM) generated from 1-meter contour line. Analysis of cluster and topographic variables indicated that the PVA –the most susceptible soil to erosion in the sub-basin–, was the one that most contributed as a source of sediments. The pXRF as more efficient in detecting the sediment sources when compared to the susceptibility meter. The results point to the efficiency and practicality of using proximal sensors to identify the sediment sources in small area basins. In addition, these techniques reinforce the importance of adopting conservation practices in soils that are found on steep terrain, especially in soils more susceptible to erosion, aiming to monitor, predict and control and the anthropogenic factors that cause water erosion at a basin scale.

Keywords: Magnetic susceptibility. X-ray fluorescence. Soil conservation. Fingerprinting.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1	EROSÃO DO SOLO	10
2.2	ABORDAGEM DE RASTREAMENTO E <i>FINGERPRINTING</i> (IMPRESSÃO DIGITAL)	13
2.3	ESPECTROMETRIA DE RAIOS-X E EQUIPAMENTO PORTÁTIL DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (PXRF).....	15
2.4	SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA.....	17
	REFERÊNCIAS	22
	ARTIGO - ORIGEM DOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS EM ÁREA DE VÁRZEA: APLICAÇÃO DE SENSORES PROXIMAIS EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA.....	33
1	INTRODUÇÃO.....	34
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	37
2.1	ÁREA DE ESTUDO.....	37
2.2	AMOSTRAGEM E ANÁLISES LABORATORIAIS.....	39
2.3	SELEÇÃO DOS ELEMENTOS TRAÇADORES	40
2.4	PROCESSAMENTOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	40
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.1	ELEMENTOS TRAÇADORES.....	42
3.2	ANÁLISE DO RELEVO.....	45
3.3	ANÁLISES DOS CLUSTERS.....	47
4	CONCLUSÃO.....	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

A erosão é um processo geomorfológico natural e lento de realocação do material da superfície terrestre (solos e sedimentos) pelas forças da água ou do vento. No entanto, a ação antrópica, em diferentes usos da terra, tem acelerado esse processo de forma insustentável (VERHEIJEN et al., 2009). Segundo o Painel Técnico Internacional sobre o solo, a erosão hídrica foi considerada a forma de degradação do solo que mais ameaça a sustentabilidade dos ecossistemas (MONTANARELLA et al., 2016).

Os impactos do processo erosivo ocorrem tanto nas áreas onde os sedimentos são removidos, quanto onde são depositados. A remoção do solo diminui a fertilidade das áreas agrícolas e, conseqüentemente, a produtividade das culturas (RIBEIRO et al., 2019). O sedimento arrastado se deposita nas várzeas, deteriorando a biodiversidade e causando assoreamento e poluição aos cursos d'água (CASHMAN et al., 2018). Além disso, em solos erodidos a retenção e infiltração de água é prejudicada e, conseqüentemente, é diminuída a capacidade de armazenagem de água no solo e a recarga do lençol freático (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017). Estes problemas se tornam mais críticos nas regiões tropicais, onde as precipitações são mais intensas (ROSAS; GUTIERREZ, 2020).

Evitar a erosão em todas as suas formas é um dos objetivos da conservação do solo que, por meio de pesquisas e de um conjunto de princípios e técnicas agrícolas, visa a identificar e dimensionar as perdas de solo para orientar o manejo mais correto das terras cultiváveis (ROCHA; DALTROZO, 2008).

Há décadas, a ciência do solo vem tentando estimar e minimizar as perdas do solo por erosão hídrica, desenvolvendo modelos preditivos de erosão (BATISTA et al., 2019). Esses modelos são geralmente avaliados a partir de uma comparação quantitativa entre valores preditos e observados da produção de sedimentos em uma área delimitada. A origem deste tipo de análise remonta às tradicionais parcelas de erosão, que são unidades experimentais básicas utilizadas no desenvolvimento dos modelos como a *Universal Soil Loss Equation* - USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1978), *Water Erosion Prediction Project* - WEPP (FLANAGAN et al., 2001) e *European Soil Erosion Model* - EUROSEN (QUINTON; SMITH, 1998), entre outros.

Mais recentemente, outra abordagem vem sendo adotada para os estudos da dinâmica dos sedimentos, baseada na identificação de traçadores ambientais, onde elementos ou substâncias são identificados e rastreados na paisagem (PULLEY; FOSTER; COLLINS, 2017; WANG et al., 2017; BATISTA et al., 2019; AKAYEZU et al., 2020; CHENG et al., 2020).

Quando essa abordagem é aplicada à identificação de fonte sedimentos em bacias hidrográficas, ela recebe o nome *fingerprinting*. A técnica consiste em coletar amostras de solos à montante e no exutório da bacia hidrográfica, medir os seus teores elementares, e depois aplicar uma estatística capaz de separar e agrupar os resultados de acordo com a semelhança ou a diferença entre eles (PULLEY; FOSTER; COLLINS, 2017).

A maioria dos estudos de *fingerprinting* se dá em grandes bacias hidrográficas, geralmente acima de 100 ha (GUZMÁN et al., 2013). Grandes bacias apresentam problemas particulares para estudos de *fingerprinting*. As longas distâncias entre as fontes de sedimento mais à montante e o exutório da bacia hidrográfica levam a um aumento do tempo de residência dos sedimentos na área. Isso pode ocasionar a descaracterização química e física do sedimento, dificultando sua correlação com as propriedades dos sedimentos de onde se originaram (KOITER et al., 2013b). Um segundo problema é que grandes bacias hidrográficas costumam ter maior diversidade de usos da terra, materiais de origem e classes de solo, o que dificulta o rastreamento dos sedimentos e encarece a pesquisa uma vez que são necessárias mais amostras para representar a área de interesse (PULLEY; COLLINS; VAN DER WAAL, 2018). Além disso, as frações granulométricas mais grosseiras, em especial a fração areia, têm se mostrado incapazes de expressar a dinâmica sedimentar em grandes bacias hidrográficas por tenderem a ser mais representadas pelas fontes mais próximas do exutório (BATISTA et al., 2019).

Nesse sentido, estudos em sub-bacias hidrográficas menores que 100 ha reduzem os custos da pesquisa e as incertezas decorrentes dos problemas supracitados. Em bacias hidrográficas menores, os sedimentos tendem a não se descaracterizar química ou fisicamente, e todas as áreas de contribuição tendem a ser representadas nos sedimentos depositados ou no exutório da bacia. Além disso, são nelas onde se aplicam todas as práticas agrícolas que impactam o ecossistema solo e, conseqüentemente, influenciam na dinâmica de sedimentos e da água em bacias hidrográficas maiores (RIBEIRO et al., 2019). Nesse contexto, estudos da dinâmica das perdas de solo e seus impactos são de suma importância para o planejamento do uso e ocupação das terras.

Com o intuito de auxiliar a detecção de áreas fontes de sedimentos, diferentes sensores estão sendo empregados na detecção de traçadores, dentre eles o equipamento portátil de fluorescência de raios-X (pXRF) e o suscetibilímetro magnético. O pXRF é um equipamento que emite raios-X de alta energia que excitam os elétrons e os deslocam deixando uma vacância em sua órbita interna. Quando elétrons retornam para a órbita original, emitem energia (fóton) na forma de fluorescência, que é característica de cada elemento químico, o que permite a identificação desse elemento (WEINDORF; BAKR; ZHU, 2014). A técnica de XRF tem sido

cada vez mais utilizada para quantificar o teor de elementos químicos do solo e de outras matrizes, uma vez que fornece um método não destrutivo das amostras, com resultados rápidos e sem geração de resíduos químicos (RIBEIRO et al., 2017; SILVA et al., 2018).

O suscetibilímetro é um equipamento que quantifica o magnetismo de uma amostra por meio da emissão de um campo magnético. Minerais diferentes respondem de formas diferentes ao campo magnético ao qual foi submetido, e assim é possível quantificá-los (THOMPSON, ROY; OLDFIELD, 1986). No solo, a assinatura magnética é uma complexa mistura de contribuições de seus diferentes minerais constituintes, de maneira que a litologia do material de origem influencia fortemente seu magnetismo (LU, 2000; MAGIERA et al., 2006; CAMARGO et al., 2014). Geralmente, o magnetismo no solo é causado pela presença de minerais ferrimagnéticos, como magnetita (Fe_3O_4), maghemita (Fe_2O_3), titanomagnetitos ($\text{Fe}_2 \times \text{TixO}_4$) e, raramente, pirotita (Fe_3S_4) (JORDANOVA, 2017).

Deste modo, os objetivos desse trabalho foram identificar as fontes de sedimentos em uma sub-bacia hidrográfica utilizando a abordagem do *fingerprinting* e avaliar a capacidade dos sensores pXRF e suscetibilímetro em identificá-las. As hipóteses são que o solo mais suscetível à erosão hídrica contribuirá mais como fonte de sedimento, e que os sensores utilizados serão capazes de identificar as fontes de sedimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Erosão do solo

A paisagem é o resultado dos fatores de formação do solo que são, clima, relevo, material de origem, organismos e tempo. Naturalmente, a transformação da paisagem se dá pela erosão geológica, que é um processo de perda de solo e sedimentos que ocorre de forma lenta e gradual (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017). A erosão acelerada é resultado da ação antrópica que gera consequências sérias para o equilíbrio dos ecossistemas, em especial nas regiões tropicais onde as condições de precipitação são mais intensas (ROSAS; GUTIERREZ, 2020).

A supressão de áreas naturais para outros usos, assim como o uso incorreto do solo, expõe a superfície que fica vulnerável à ação do vento e da água das chuvas. Esse fato tem contribuído para acelerar o processo erosivo de tal forma que a erosão foi identificada como a ameaça global mais grave à sustentabilidade (MONTANARELLA et al., 2016). As

consequências são impactantes, pois o solo removido na forma de sedimento leva ao soterramento das várzeas, ao assoreamento dos cursos d'água, à perda da biodiversidade e da capacidade de recarga dos lençóis freáticos, reduz os rendimentos das culturas aumentando os custos de produção (RIBEIRO et al., 2019).

A conservação do solo e da água é um ramo da ciência do solo que há anos vem trabalhando para mitigar os efeitos da erosão hídrica. Os processos erosivos podem ser estudados sob diferentes abordagens, com destaque para as que quantificam perdas de solo e as que avaliam a qualidade do comportamento erosivo dos terrenos (SALOMÃO, 1999). No tocante a esse estudo, foi utilizada a segunda abordagem.

Muitos dos estudos de erosão hídrica se dão em bacias hidrográficas. Entende-se como bacia hidrográfica, uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, e é composta de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório (TUCCI, 1997). Dessa forma, pode-se dizer que no seu exutório estão representados todos os processos que fazem parte do seu sistema (PORTO; PORTO, 2008). Ainda segundo os autores, para fins de estudos e planejamento, as bacias hidrográficas podem ser subdivididas em sub-bacias hidrográficas, microbacias, dependendo da escala e do problema a ser solucionado, atentando, portanto, para a subjetividade desses conceitos.

Segundo Salomão (1999), didaticamente a erosão do solo pode ser influenciada pelos fatores chuva, topografia, cobertura vegetal e classes de solos. Em relação à chuva, de maneira geral, quanto maior é o evento da precipitação, maior é seu impacto na erosão, uma vez que não há tempo suficiente para a infiltração da água no solo, em condições de excesso de chuva.

A influência da topografia no processo erosivo se dá pela declividade e pelo comprimento de rampa, uma vez que eles interferem na velocidade das enxurradas. Quanto maior o declive e o comprimento de rampa, maior será a energia cinética da água que escoar na superfície e, conseqüentemente, maior o potencial erosivo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017). Com a finalidade de fornecer informações sobre possibilidade do emprego de equipamentos agrícolas, e facilitar inferências sobre susceptibilidade à erosão dos vários ambientes, diferenciou-se as condições de declividade nas seguintes classes de relevo: Plano, com declividades inferiores a 3%; Suave Ondulado, com declividades entre 3 até 8%; Ondulado, com declividades maiores que 8% até 20%; Forte Ondulado, com declividades maiores que 20 até 45%; Montanhoso, com declividades maiores que 45% até 75% e Escarpado, com declividades maiores que 75% (IBGE, 2015).

A cobertura vegetal se destaca como uma das mais eficientes no controle da erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017). Segundo os autores os efeitos dela contribuem para proteger o impacto direto das gotas de chuva, dispersar e quebrar a energia cinética da água de escoamento superficial, aumentar a infiltração de água pela produção de poros no solo pela ação das raízes e aumentar a capacidade de retenção de água pela estruturação do solo, e pela produção e incorporação de matéria orgânica.

As diferentes classes de solos influenciam na erosão por meio das suas propriedades físicas, principalmente pela textura, estrutura, permeabilidade e densidade, e pelas suas propriedades químicas, biológicas e mineralógicas (SALOMÃO, 1999). Segundo o autor, a textura, que é a relação entre os teores de argila, silte e areia no solo, influencia na capacidade de infiltração e absorção de água. Solos de textura arenosa são mais porosos, o que permite rápida infiltração de água e dificulta o escoamento superficial. No entanto, a baixa proporção de argila deixa esse solo menos coeso, uma vez que a argila atua como um agente ligante entre as partículas maiores.

A estrutura, diz respeito ao arranjo das partículas no solo. Ela também influencia na capacidade de infiltração e absorção de água da chuva, e no arraste das partículas. Solos mais intemperizados, como os Latossolos, tendem a ter maiores concentrações de argilas oxídicas, e acumulam mais óxidos de Fe e Al, que atuam como agregantes entre as partículas que, com o tempo, proporcionam estrutura granular, aumentando a permeabilidade e a resistência à erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017). A permeabilidade, portanto, é outra propriedade que tem relação com a porosidade e infiltração de água no solo. De maneira geral, solos mais arenosos são permeáveis por apresentarem maiores espaços entre as partículas devido ao seu tamanho, no entanto são solos mais suscetíveis à erosão hídrica por haver pouca, ou nenhuma agregação entre as partículas. Vale ressaltar que alguns Latossolos podem apresentar maior permeabilidade do que solos arenosos, devido ao forte efeito das argilas oxídicas (SALOMÃO, 1999). Por fim, a densidade, que expressa a relação entre a massa e o volume de solo, é uma propriedade muito relacionada com o manejo agrícola, uma vez que a pressão exercida no solo pelo maquinário ocasiona compactação entre as partículas, diminuindo os espaços entre elas, a porosidade e a permeabilidade e, conseqüentemente, aumentando a suscetibilidade à erosão (SALOMÃO, 1999).

Em relação às propriedades químicas, biológicas e mineralógicas, elas influenciam no estado de agregação entre as partículas. As propriedades químicas e mineralógicas do solo muitas vezes estão correlacionadas, uma vez que os minerais constituintes do solo determinam sua expressão química. Quimicamente, solos pobres em bases, como Ca, Mg e Na, e ricos em

óxidos de Fe e Al, tendem a se estruturarem por microagregação, que proporciona alta porosidade entre as partículas. Já os solos ricos em bases tendem a estruturas poliédricas, como prismáticas ou em blocos, com características de baixa porosidade e permeabilidade. Quanto à mineralogia, dependendo do argilomineral o solo tem diferente comportamento erosivo. Como exemplo, Salomão (1999) cita as argilas do tipo esmectita que são pouco estáveis em água quando comparadas as caulinitas e, portanto, solos com aquele tipo de argilas são mais erodíveis. Já as ilitas apresentam comportamento intermediário.

Diante dos problemas e motivos de ocorrência inerentes à erosão e seus impactos, a conservação do solo e da água há décadas vem utilizando, majoritariamente, a abordagem quantitativa da perda de solo por erosão hídrica por meio de desenvolvimento de modelos preditivos de perda de solo (QUINTON; SMITH, 1998). Esses modelos são geralmente avaliados a partir de uma comparação quantitativa entre valores preditos e observados da produção de sedimentos em uma área delimitada, denominada parcelas de erosão. Os dados obtidos nas parcelas de erosão fornecem informações importantes que alimentam os modelos de predição, mas apresentam várias limitações em termos de representatividade dos dados, de resolução espacial e temporal, de padrões em áreas extensas, requer muitos anos de medição e, conseqüentemente, altos custos envolvidos (MABIT et al., 1999).

Com o intuito de reduzir a erosão hídrica nas áreas agrícolas, agências governamentais de assistência técnica e extensão agrícola introduziram e disseminaram práticas de conservação do solo e da água em todo o Brasil (ZONTA et al., 2012). As práticas de agricultura de conservação incluem lavoura de conservação, terraceamentos, cultivo em nível, rotação de culturas, gestão de resíduos e culturas de cobertura (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017).

2.2 Abordagem de rastreamento e *fingerprinting* (impressão digital)

Na tentativa de melhorar os métodos e as técnicas para entender a dinâmica dos processos erosivos na paisagem, a ciência do solo vem se destacando da abordagem de rastreamento de traçadores ambientais. Entende-se como traçador, todo elemento químico ou substância com características marcantes, capazes de serem rastreadas na paisagem (GUZMÁN et al., 2013). Algumas características são necessárias para que um elemento químico, uma substância ou uma propriedade do solo seja considerados um bom traçador. De acordo com Zhang et al. (2001), um traçador ideal teria as seguintes características: forte ligação às partículas do solo ou pronta incorporação nos agregados do solo; alta sensibilidade analítica; fácil e de baixo custo para ser quantificado; nenhuma interferência no transporte de sedimentos;

baixa absorção pelas plantas; ambientalmente benigna e disponível em variantes com propriedades físico-químicas semelhantes, mas distinguíveis, para rastreamento múltiplo.

A abordagem de rastreamento de traçadores foi desenvolvida partindo de outras finalidades, que não a identificação de fontes de sedimentos (KOITER et al., 2013b) e continua sendo empregada para tanto. Gingele e Dedeckker (2004) a utilizaram para entender as alterações climáticas, Bird et al. (2010), para entender a dinâmica de contaminantes, Dawson e Hillier (2010), aplicaram na perícia criminal, Saber; Mauro e Sirivedhin (2006), aplicaram na forense ambiental, McConnachie e Petticrew (2006), utilizaram no fornecimento de matéria orgânica, Collins et al. (2010), aplicaram na avaliação de práticas de manejo. No entanto, os cientistas do solo têm adotado essa abordagem, também com sucesso, uma vez ela fornece informações adicionais à ciência do solo como, o rastreamento do movimento de sedimentos pela paisagem em várias escalas temporais e espaciais, a estimativa das taxas de erosão do solo, e quando ela é empregada na identificação das fontes de sedimentos, recebe o nome de *fingerprinting* (GUZMÁN et al., 2013).

Segundo Koiter et al. (2013), a abordagem de rastreamento de sedimentos e a de impressões digitais de sedimentos (*fingerprinting*) são muitas vezes confundidas, mas podem ter significados diferentes. Segundo os autores, na abordagem de rastreamento de sedimento, o rastreamento se dá na direção a jusante da origem do sedimento, e pressupõe que a origem da fonte de sedimento é conhecida, e que os traçadores são identificados e bem compreendidos. Ressaltam também que os estudos de rastreamento de sedimentos frequentemente usam traçadores introduzidos artificialmente, como resultado das diferentes atividades humanas, como partículas fluorescentes (GRANGER et al., 2011), elementos de terras raras (como por exemplo, os lantanídeos) (SPENCER; SUZUKI; HILLIER, 2011) e radionuclídeos radioativos (como por exemplo, o ^{137}Cs) (WILSON; PAPANICOLAOU; DENN, 2012).

Já a impressão digital de sedimentos (*fingerprinting*), parte do princípio de que os pesquisadores desconhecem as fontes de sedimentos e intencionam identificá-las. Ela se baseia na comparação entre os teores ou propriedades dos traçadores selecionados no sedimento coletado no final de uma bacia hidrográfica (mistura de sedimentos) com os teores ou propriedades dos diferentes solos das diferentes áreas à montante da bacia, e a aplicação de uma estatística que seja capaz de estimar a contribuição relativa das fontes para, assim, identificar as fontes contribuintes de sedimentos dentro da bacia hidrográfica (GUZMÁN et al., 2013). Ainda segundo esses autores, uma característica dessa abordagem é que a maioria desses estudos é conduzida em bacias hidrográficas, em especial nas grandes bacias hidrográficas.

Diferentes atributos dos sedimentos (físicos, químicos ou biológicos) foram usados nos estudos de impressões digitais. O material de origem do solo tende a fornecer alguns desses atributos, entre eles a suscetibilidade magnética e os teores dos elementos, que servem como traçadores. Por exemplo, rochas ígneas, máficas, como o gabro, tendem a apresentar maior magnetismo do que rochas félsicas, metamórficas, como o gnaiss, decorrente da maior presença de minerais ricos em ferro (JORDANOVA, 2017).

A quantidade e o tipo de atributos usados em estudos específicos variam, dependendo das características da bacia hidrográfica, dos objetivos do estudo e da disponibilidade da capacidade analítica (COLLINS et al., 2017).

Vale ressaltar que, segundo Koiter et al. (2013), grandes bacias apresentam problemas particulares para estudos de impressões digitais. As longas distâncias entre as potenciais fontes de sedimento à montante e às áreas à jusante da bacia hidrográfica, geralmente levam a um aumento do tempo de residência dos sedimentos na área. Isso pode ocasionar a descaracterização química e física do sedimento dificultando sua correlação com as propriedades dos sedimentos de onde se originaram. Além disso, grandes bacias hidrográficas costumam ter uma diversidade de usos, materiais de origem e classes de solo, o que dificulta o rastreamento, encarecem a pesquisa e geram incertezas nos resultados (PULLEY; COLLINS; VAN DER WAAL, 2018).

Nesse sentido, os estudos em sub-bacias hidrográficas diluem os problemas supracitados. Elas são importantes para o planejamento estratégico local, para a estruturação de programas de monitoramento ambiental e também porque constituem as unidades agrícolas que correspondem ao maior conjunto de produtores rurais (TEODORO et al., 2007). São nelas onde se aplicam todas as práticas agrícolas que impactam o ecossistema solo e, conseqüentemente, influenciam na dinâmica de sedimentos e da água em bacias hidrográficas maiores.

2.3 Espectrometria de raios-X e equipamento portátil de fluorescência de raios-X (pXRF)

A espectrometria de raios-X é o estudo da interação entre a radiação eletromagnética na faixa dos raios-X com a matéria, e é uma técnica muito utilizada e com numerosas aplicações na indústria (WEINDORF; BAKR; ZHU, 2014). A análise de fluorescência de raios-X (XRF) é um ramo da espectrometria que, atualmente, é uma das técnicas de raios-X mais amplamente aplicadas nas ciências ambientais, mineração, química, metalurgia, arqueologia, ciência do solo e agronomia, por apresentar algumas vantagens sobre outras técnicas, como a não destruição

de amostras, capacidade de identificar e quantificar elementos da Tabela Periódica (de Mg a U), facilidade de uso e preparação das amostras, limites de detecção relativamente baixos, velocidade e precisão dos resultados (WEINDORF et al., 2012b).

A XRF é uma técnica de absorção/emissão de raios-X usada para determinar e quantificar a composição química de uma amostra. Segundo Gates (2006), o princípio da técnica é que as energias da maioria dos raios-X são semelhantes às energias de ligação núcleo-elétron dos átomos e, como os elétrons absorvem energia dos raios-X, quando os elementos são submetidos a raios-X, os elétrons são transferidos para estados de energia excitados. Nessa condição o elétron pula da camada mais interna para a próxima, mais externa, e emite um fóton que pode ser detectado. Esse fóton, que é uma forma de energia, é característico de cada elemento químico, podendo, então, distingui-los (WEINDORF; BAKR; ZHU, 2014).

Para identificar os elementos da amostra, é utilizada a relação entre o comprimento de onda da emissão do fóton e o número atômico do elemento químico, e para quantificar as concentrações elementares é utilizada a intensidade da energia emitida pelo fóton (KANIU et al., 2012).

Embora os instrumentos que utilizam a técnica de XRF venham sendo aplicados em investigações científicas há várias décadas, o desenvolvimento de instrumentos portáteis de fluorescência de raios-X (pXRF) tornou esta tecnologia mais disponível e acessível para uso mais amplo (WEINDORF; BAKR; ZHU, 2014). Os novos aparelhos pXRF permitem que os resultados das leituras em campo sejam baixados diretamente em planilhas de softwares largamente utilizados, permitindo avaliações estatísticas rápidas e fáceis das concentrações elementares (PEINADO et al., 2010).

Alguns fatores podem influenciar as análises pelo equipamento, entre eles, destacam-se a umidade, sendo que quanto mais úmida a amostra, maior a subestimação dos resultados (STOCKMANN et al., 2016; SAHRAOUI; HACHICHA, 2017), e a fração granulométrica, sendo que as frações menores tendem a apresentarem maiores teores dos elementos (MARUYAMA et al., 2008). Laiho e Peramaki (2005) recomendaram, para fins de padronização das pesquisas, que as leituras em laboratório sejam feitas nas amostras secas ao ar e passadas na peneira de 2 mm.

No que diz respeito às aplicações do pXRF na ciência do solo pelo mundo, as regiões temperadas concentram o maior número de estudos envolvendo o sensor para caracterização do solo, e as regiões tropicais demonstraram recentemente um interesse crescente na aplicação dele para estudos relacionados ao solo devido à ampla gama de finalidades em que este equipamento pode ser utilizado (SILVA et al., 2021).

No Brasil, destacam-se os estudos de Silva et al. (2019), que analisaram a variabilidade da composição elementar em uma toposequência de solos derivados de quartzito; Silva et al. (2017), que previram propriedades dos solos e compararam com métodos de regressão linear múltipla a Random Forest; Silva et al. (2018), que investigaram o intemperismo de um Cambissolo do cerrado por meio da quantificação dos conteúdos elementares; Mancini et al. (2019), que mapearam os materiais de origem em solos do cerrado com auxílio de algoritmos de aprendizagem de máquina, entre outros.

Ainda no Brasil, poucos trabalhos foram encontrados na área da conservação do solo e da água aplicando o sensor pXRF com a abordagem de *fingerprinting* em bacias hidrográficas. Dentre eles se destaca o trabalho de Batista et al. (2019), onde os autores utilizaram o conhecimento pedológico na seleção de traçadores ambientais para discriminar fonte de sedimentos em uma grande bacia hidrográfica. Nesse contexto, não foram identificados trabalhos aplicando a abordagem de *fingerprinting* com o sensor pXRF em pequenas bacias hidrográficas, o que evidencia que ainda sejam necessários mais estudos para avaliar os efeitos do sensor nas diferentes condições dos solos tropicais (RIBEIRO et al., 2017).

2.4 Suscetibilidade magnética

A suscetibilidade magnética é uma medida quantitativa do grau de magnetização de um material em resposta a um campo magnético a ele aplicado, e esta resposta se deve às propriedades individuais dos átomos ou moléculas e às suas interações (THOMPSON, ROY; OLDFIELD, 1986).

O magnetismo é expresso pelo momento magnético associado aos elétrons, e tem sua origem explicada por dois motivos. O primeiro é o *spin* (número quântico) intrínseco da partícula. Na distribuição eletrônica, o valor de cada *spin* pode ser positivo, negativo ou, quando a orbital está completa, a soma dos *spins* é igual a zero. O segundo motivo é o movimento dos elétrons em orbitais. Todos os elétrons nas camadas completas ou em ligações covalentes estão emparelhados com um elétron de *spin* oposto em cada orbital, de modo que somente íons com camadas incompletas podem ter *spin* total diferente de zero (COEY; HINDS, 2001).

Como exemplo dessa condição, são apresentadas as configurações eletrônicas de dois íons: Si e Fe. Nota-se que as camadas eletrônicas do Si^{4+} (FIGURA 1) estão completas e os elétrons nas orbitais *s* e *p* estão emparelhados. Dessa forma esta é uma configuração não-magnética. Para o Fe^{3+} (FIGURA 2), nota-se que as orbitais *3d* estão incompletas. Assim este íon expressa o momento magnético.

Figura 1- Configuração eletrônica do íon Si^{4+} .

Si^{4+}				
1s	2s	2p		
↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓

Fonte: adaptado de Curi et al. (2017).

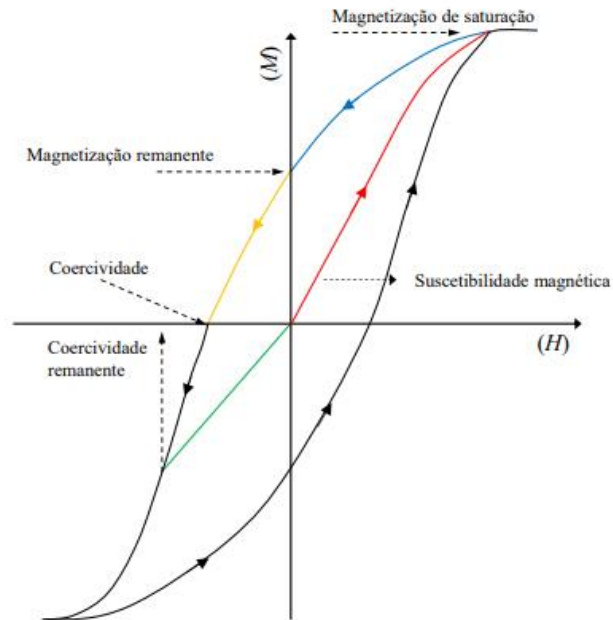
Figura 2 - Configuração eletrônica do Fe^{3+} .

Fe^{3+}													
1s	2s	2p			3s	3p			3d				
↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑

Fonte: adaptado de Curi et al. (2017).

Uma maneira de se obterem parâmetros que permitem caracterizar os minerais magnéticos, dentre eles a suscetibilidade magnética, é através da curva de histerese (FIGURA 3) (COEY; HINDS, 2001). Essa curva é gerada pela aplicação e remoção de um campo magnético. Quando o campo magnético é aplicado, o mineral aumenta sua magnetização até certo ponto, e quando o campo magnético é removido a magnetização diminui, mas não retorna à zero, necessitando, para isso, a aplicação de um campo magnético em direção contrária. Nesse processo é gerada a curva de histerese magnética (THOMPSON, ROY; OLDFIELD, 1986).

Figura 3- Curva de histerese magnética, representando, entre outros parâmetros, a suscetibilidade magnética (COEY; HINDS, 2001).



M = magnetização; H = campo magnético.

A suscetibilidade magnética também pode ser quantificada por meio de sensores próximos. Um dos equipamentos mais utilizados em estudos do solo é o sistema Bartington MS2. Este sistema consiste na aplicação de um campo magnético de 80 A m^{-1} em uma amostra não magnetizada (DEARING, 1999) e, dependendo da característica magnética da amostra, ela será mais ou menos magnetizada. A técnica é simples, rápida, não destrutiva, segura e de baixo custo (XIE; DEARING; BLOEMENDAL, 2000).

No solo, a assinatura magnética é uma complexa mistura de contribuições de seus diferentes minerais que constituem os materiais de origem (THOMPSON, ROY; OLDFIELD, 1986). Segundo os autores, os minerais podem ser classificados, quanto ao seu caráter magnético, como ferrimagnéticos, minerais que exibem forte caráter magnético; antiferromagnéticos, minerais que apresentam momento magnético nulo ou zero; paramagnéticos, minerais que apresentam pequena magnetização e, diamagnéticos, minerais que não apresentam momento magnético.

O material de origem do solo, portanto, influencia fortemente seu magnetismo que, geralmente, é dominado pela presença de pequenas quantidades de óxidos ferrimagnéticos, como o mineral primário magnetita (Fe_3O_4), e os minerais secundários maghemita (Fe_2O_3),

titanomagnetitos ($\text{Fe}_2 \text{xTi}_x\text{O}_4$) e, mais raramente, pirotita (Fe_3S_4) e, em menor quantidade, pelos óxidos antiferromagnéticos, como a hematita e goethita (JORDANOVA, 2017). Nota-se, então, que existe uma estreita relação entre o magnetismo e a fração argila do solo, comprovada em estudos (LU et al., 2008; LU; ZHU; YU, 2012), e essa característica de alguns óxidos de Fe de possuírem caráter magnético tem feito deles importantes marcadores ambientais (CURI et al., 2017).

A presença desses óxidos tende a se acentuar em ambientes tropicais, uma vez que nesses ambientes a mineralogia do solo reflete as condições de intenso intemperismo-lixiviação a que os solos foram submetidos e, por isso, podem apresentar substanciais teores de óxidos de Fe, e outros minerais secundários (CURI et al., 2017).

Existe uma vasta literatura que indica altos teores de Fe, em todas suas formas, em rochas básicas, de origem magmática, tanto intrusiva como extrusiva (SILVA; SOUZA JUNIOR; COSTA, 2009; SANTOS; SANT'OVAIA; ESPINHA MARQUES, 2014; CURI et al., 2017; POGGERE et al., 2018).

No Brasil, é expressiva a área de Latossolos Vermelhos, com destaque àqueles desenvolvidos de basalto. No entanto, em Minas Gerais também têm aqueles desenvolvidos de tufito, itabirito e gabro, que além de hematíticos, também apresentam maghemita ou titanomaghemita na fração argila, e magnetita ou titanomagnetita na fração areia, que apresentam altos teores de Fe e são responsáveis pela forte magnetização desses solos (FABRIS et al., 1997).

Os primeiros trabalhos que utilizaram a suscetibilidade magnética no Brasil, a relacionaram com as classes de solo (CURI; FRANZMEIER, 1984, 1987; RESENDE; ALLAN; COEY, 1986). Outros trabalhos foram sendo feitos, como caracterização e ocorrência de um solo maghemítico em associação com dolomita ferroana em Minas Gerais (MOUKARIKA et al., 1991); a caracterização da maghemita em solo de origem vulcânica no Paraná (COSTA et al., 1999); a caracterização dos materiais de origens de acordo com as frações areia silte e argila de solos derivados de gnaisse, basalto, diabásio arenito e itabirito (FONTES et al., 2000); a identificação e quantificação dos minerais ferrimagnéticos de solos do Estado do Paraná (SOUZA JUNIOR et al., 2010); a identificação de diferentes compartimentos da paisagem em uma vertente, no Município de Gilbués-PI (SANTOS et al., 2011); estudo do potencial dos modelos de paisagem na identificação e caracterização de Latossolos (MATIAS et al., 2013); delimitação áreas de manejo específico conjuntamente com modelos matemáticos e de paisagem (MATIAS et al., 2015); caracterização da variabilidade espacial da terra preta arqueológica na região de Manicoré, Amazonas (OLIVEIRA et al.,

2015); a aplicação de diferentes métodos para quantificar a maghemita em solos originados de itabirito, basalto, gabro, tufita, gnaisse e anfibolito (POGGERE et al., 2018); investigação da distribuição da suscetibilidade magnética em solos brasileiros em escala nacional (BARBOSA et al., 2021), entre outros.

Nos ambientes de clima temperado, as propriedades magnéticas também têm sido amplamente utilizadas na abordagem de *fingerprinting* para identificar fontes de sedimentos (XIE et al., 1999; ROYALL, 2001, 2004, 2007; MANJORO et al., 2017; PULLEY; COLLINS; VAN DER WAAL, 2018), mas existem pouquíssimos trabalhos aplicando essa abordagem em ambientes tropicais, entre eles Lima et al. (2020), que investigaram as fontes de sedimentos numa grande bacia hidrográfica, na bacia do Alto Rio Grande, Sudeste do Brasil. No entanto nenhum trabalho foi encontrado para pequenas bacias em solos tropicais.

REFERÊNCIAS

- AKAYEZU, P.; MUSINGUZI, L.; NATUGONZA, V.; OGUTU-OHWAYO, R.; MWATHE, K.; DUTTON, C.; MANYIFIKA, M. Using sediment fingerprinting to identify erosion hotspots in a sub-catchment of Lake Kivu, Rwanda. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 12, 2020. doi: 10.1007/s10661-020-08774-5.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D. da; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. de. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 124–130, 2001. doi: 10.1590/s1415-43662001000100023.
- ARAUJO, M. A.; PEDROSO, A. V.; AMARAL, D. C.; ZINN, Y. L. Paragênese mineral de solos desenvolvidos de diferentes litologias na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 1, p. 11–25, 2014. doi: 10.1590/S0100-06832014000100002.
- BARBOSA, J. Z.; POGGERE, G.; SILVA, S. H. G.; MANCINI, M.; MOTTA, A. C. V.; MARQUES, J. J. G. de S. e. M.; CURTI, N. National-scale spatial variations of soil magnetic susceptibility in Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, n. February, 2021. doi: 10.1016/j.jsames.2021.103191.
- BATISTA, P. V. G.; LACEBY, J. P.; SILVA, M. L. N.; TASSINARI, D.; BISPO, D. F. A.; CURTI, N.; DAVIES, J.; QUINTON, J. N. Using pedological knowledge to improve sediment source apportionment in tropical environments. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 9, p. 3274–3289, 2019. doi: 10.1007/s11368-018-2199-5.
- BELLANGER, B.; HUON, S.; VELASQUEZ, F.; VALLÈS, V.; GIRARDIN, C.; MARIOTTI, A. Monitoring soil organic carbon erosion with $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ on experimental field plots in the Venezuelan Andes. **Catena**, v. 58, n. 2, p. 125–150, 2004. doi: 10.1016/j.catena.2004.03.002.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 10ª Edição ed. São Paulo SP: Ícone, 2017.
- BIRD, G.; BREWER, P. A.; MACKLIN, M. G.; NIKOLOVA, M.; KOTSEV, T.; MOLLOV, M.; SWAIN, C. Quantifying sediment-associated metal dispersal using Pb isotopes: Application of binary and multivariate mixing models at the catchment-scale. **Environmental Pollution**, v. 158, n. 6, p. 2158–2169, 2010. doi: 10.1016/j.envpol.2010.02.020.
- CALDERANO FILHO, B.; CARVALHO JÚNIOR, W.; CALDERANO, S. B.; GUERRA, A. J. T. SUSCETIBILIDADE DOS SOLOS À EROSÃO NA ÁREA DE ENTORNO DO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE TOMBOS (MG). **Revista Geonorte, Edição especial 4; V.10; N.10.**, p. 476–481, 2014.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BAHIA, A. S. R. de S. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agrícola**,

v. 71, n. 3, p. 244–256, 2014. doi: 10.1590/S0103-90162014000300010.

CAMÊLO, D. de L.; KER, J. C.; FONTES, M. P. F.; CORRÊA, M. M.; DA COSTA, A. C. S.; MELO, V. F. Pedogenic iron oxides in iron-rich oxisols developed from mafic rocks. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 41, n. January, 2017. doi: 10.1590/18069657rbc20160379.

CARVALHO FILHO, A. de; INDA, A. V.; FINK, J. R.; CURI, N. Iron oxides in soils of different lithological origins in Ferriferous Quadrilateral (Minas Gerais, Brazil). **Applied Clay Science**, v. 118, n. December, p. 1–7, 2015. doi: 10.1016/j.clay.2015.08.037.

CASHMAN, M. J.; GELLIS, A.; SANISACA, L. G.; NOE, G. B.; COGLIANDRO, V.; BAKER, A. Bank-derived material dominates fluvial sediment in a suburban Chesapeake Bay watershed. **River Research and Applications**, v. 34, n. 8, p. 1032–1044, 2018. doi: 10.1002/rra.3325.

CHENG, Q.; WANG, S.; PENG, T.; CAO, L.; ZHANG, X.; BUCKERFIELD, S. J.; ZHANG, Y.; COLLINS, A. L. Sediment sources, soil loss rates and sediment yields in a Karst plateau catchment in Southwest China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 304, n. May, 2020. doi: 10.1016/j.agee.2020.107114.

COEY, J. M. D.; HINDS, G. Magnetic electrodeposition. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 326, n. 1–2, p. 238–245, 2001. doi: 10.1016/S0925-8388(01)01313-5.

COLLINS, A. L.; PULLEY, S.; FOSTER, I. D. L.; GELLIS, A.; PORTO, P.; HOROWITZ, A. J. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users. **Journal of Environmental Management**, v. 194, p. 86–108, 2017. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.09.075.

COLLINS, A. L.; WALLING, D. E.; MCMELLIN, G. K.; ZHANG, Y.; GRAY, J.; MCGONIGLE, D.; CHERRINGTON, R. A preliminary investigation of the efficacy of riparian fencing schemes for reducing contributions from eroding channel banks to the siltation of salmonid spawning gravels across the south west UK. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 6, p. 1341–1349, 2010. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.02.015.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 7, p. 1991–2007, 2015. doi: 10.5194/gmd-8-1991-2015.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, v. 47, n. 4, p. 466–473, 1999. doi: 10.1346/CCMN.1999.0470408.

COSTA, S. Â. D.; KER, J. C.; SIMÕES, D. F. de F.; FONTES, M. P. F.; FABRIS, J. D.; ANDRADE, F. V. Pedogênese e classificação de latossolos desenvolvidos de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 2, p. 359–371,

2014. doi: 10.1590/S0100-06832014000200001.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. F. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 342–346, 1984.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. F. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 153–158, 1987.

CURI, N.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; MENEZES, M. D. **Mapeamento de solos e magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais**. Lavras-MG: Editora: UFLA, 2017.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1862–1866, 2007. doi: 10.1590/s1413-70542007000600039.

DAWSON, L. A.; HILLIER, S. Measurement of soil characteristics for forensic applications. **Surface and Interface Analysis**, v. 42, n. 5, p. 363–377, 2010. doi: 10.1002/sia.3315.

DEARING, J. Environmental Magnetic Susceptibility. **Interpretation A Journal Of Bible And Theology**, 1999.

DEASY, C.; QUINTON, J. N. Use of rare earth oxides as tracers to identify sediment source areas for agricultural hillslopes. **Solid Earth Discussions**, v. 2, n. 2, p. 195, 2010. doi: 10.5194/sed-2-195-2010.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. Great Britain, 1992.

DING, Z.; ZHANG, Z.; LI, Y.; ZHANG, L.; ZHANG, K. Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns. **Soil and Tillage Research**, v. 199, n. October 2018, p. 104568, 2020. doi: 10.1016/j.still.2019.104568.

FABRIS, J. D.; MUSSEL, W. D. N.; COEY, J. M. D.; DE JESUS FILHO, M. F.; GOULART, A. T. Mg-rich iron oxide spinels from tuffite. **Hyperfine Interactions**, v. 110, n. 1–2, p. 33–40, 1997. doi: 10.1023/A:1012611029591.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 515–524, 1999. doi: 10.1590/s0100-06831999000300004.

FLANAGAN, D. C.; ASCOUGH, J. C.; NEARING, M. A.; LAFLEN, J. M. The Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model. **Landscape Erosion and Evolution Modeling**, n. 1978, p. 145–199, 2001. doi: 10.1007/978-1-4615-0575-4_7.

FONTES, M. P. F.; DE OLIVEIRA, T. S.; DA COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, v. 96, n. 1–2, p. 81–99, 2000. doi: 10.1016/S0016-7061(00)00005-7.

FOX, J. F.; PAPANICOLAOU, A. N. The use of carbon and nitrogen isotopes to study watershed erosion processes. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 4, p. 1047–1064, 2007. doi: 10.1111/j.1752-1688.2007.00087.x.

GATES, W. P. X-ray absorption spectroscopy. In: **Developments in Clay Science**. Elsevier Ltd, 2006. p. 789–864.

GINGELE, F. X.; DE DECKKER, P. Fingerprinting Australia's rivers with clay minerals and the application for the marine record of climate change. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 51, n. 3, p. 339–348, 2004. doi: 10.1111/j.1400-0952.2004.01061.x.

GRANGER, S. J.; BOL, R.; HAWKINS, J. M. B.; WHITE, S. M.; NADEN, P. S.; OLD, G. H.; MARSH, J. K.; BILOTTA, G. S.; BRAZIER, R. E.; MACLEOD, C. J. A.; HAYGARTH, P. M. Using artificial fluorescent particles as tracers of livestock wastes within an agricultural catchment. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 6, p. 1095–1103, 2011. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.12.005.

GUZMÁN, G.; QUINTON, J. N.; NEARING, M. A.; MABIT, L.; GÓMEZ, J. A. Sediment tracers in water erosion studies: Current approaches and challenges. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 4, p. 816–833, 2013. doi: 10.1007/s11368-013-0659-5.

HANESCH, M.; SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, v. 161, n. 1, p. 50–56, 2005. doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02577.x.

HARTIGAN, J. . **Clustering Algorithms**. Journal of classification, v2, n. 1, p. 63-76, 1985.

HARTIGAN, J. A.; WONG, M. A. Algorithm AS 136 A K-Means Clustering Algorithm. **Journal of the Royal Statistical Society Series B Methodological**, v. 28, n. 1, p. 100–108, 2012.

HURLBUT, C. S.; KLEIN, C. **Manual of Mineralogy**. Wiley, 1985.

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. 3ª edição. Rio de Janeiro, 2015.

JORDANOVA, N. Magnetism of materials occurring in the environment—Basic overview. **Soil Magnetism**, n. Md, p. 1–28, 2017. doi: 10.1016/b978-0-12-809239-2.00001-2.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de atributos e ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.; SCHAEFER, R., C. E. G. (Eds). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. v1, 2000, p. 107–138.

KÄMPF, N.; CURI, N. **Pedologia fundamentos**. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012.

KANIU, M. I.; ANGEYO, K. H.; MWALA, A. K.; MANGALA, M. J. Direct rapid analysis of trace bioavailable soil macronutrients by chemometrics-assisted energy dispersive X-ray fluorescence and scattering spectrometry. **Analytica Chimica Acta**, v. 729, p. 21–25, 2012. doi: 10.1016/j.aca.2012.04.007.

KOITER, A. J.; LOBB, D. A.; OWENS, P. N.; PETTICREW, E. L.; TIESSEN, K. H. D.; LI, S. Investigating the role of connectivity and scale in assessing the sources of sediment in an agricultural watershed in the Canadian prairies using sediment source fingerprinting. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 10, p. 1676–1691, 2013a. doi: 10.1007/s11368-013-0762-7.

KOITER, A. J.; OWENS, P. N.; PETTICREW, E. L.; LOBB, D. A. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins. **Earth-Science Reviews**, v. 125, p. 24–42, 2013b. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.05.009.

KUHN, M.; WING, J.; WESTON, S.; WILLIAMS, A.; KEEFER, C.; ENGELHARDT, A.; BENESTY, M. Package “caret”. **The R Journal**, v. 223, 2020.

LAIHO, J. V. P.; PERAMAKI, P. Evaluation of portable X-ray fluorescence (PXRF) sample preparation methods. **Special Paper of the Geological Survey of Finland.**, p. 73–82, 2005.

LIMA, P. L. T.; SILVA, M. L. N.; BATISTA, P. V. G.; QUINTON, J.; MAHER, B.; CURI, N. Potencial de uso da susceptibilidade magnética como indicador da erosão hídrica em solos tropicais. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, n. 1, p. 5–8, 2015.

LIMA, P. L. T.; SILVA, M. L. N.; QUINTON, J. N.; ARMSTRONG, A.; INDA, A. V.; BATISTA, P. V. G.; POGGERE, G. C.; CURI, N. Tracing the origin of reservoir sediments using magnetic properties in Southeastern Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 847–864, 2020. doi: 10.5433/1679-0359.2020v41n3p847.

LU, S. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. **Catena**, v. 40, n. 4, p. 359–373, 2000. doi: 10.1016/S0341-8162(00)00092-8.

LU, S. G.; XUE, Q. F.; ZHU, L.; YU, J. Y. Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China. **Catena**, v. 73, n. 1, p. 23–33, 2008. doi: 10.1016/j.catena.2007.08.004.

LU, S. G.; ZHU, L.; YU, J. Y. Mineral magnetic properties of Chinese paddy soils and its pedogenic implications. **Catena**, v. 93, p. 9–17, 2012. doi: 10.1016/j.catena.2012.01.002.

MABIT, L.; BERNARD, C.; LAVERDIÈRE, M. R.; WICHEREK, S. Assessment of soil erosion in a small agricultural basin of the St. Lawrence River watershed. **Hydrobiologia**, v. 410, p. 263–268, 1999. doi: 10.1023/A:1003802602613.

MAGIERA, T.; STRZYSZCZ, Z.; KAPICKA, A.; PETROVSKY, E. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. **Geoderma**, v. 130, n. 3–4, p. 299–311, 2006. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.02.002.

MANCINI, M.; WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S.; SILVA, S. H. G.; DOS SANTOS TEIXEIRA, A. F.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Tracing tropical soil parent material analysis via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazilian Cerrado. **Geoderma**, v. 337, n. October 2018, p. 718–728, 2019a. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.10.026.

MANCINI, M.; WEINDORF, D. C.; SILVA, S. H. G.; CHAKRABORTY, S.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Parent material distribution mapping from tropical soils data via machine learning and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazil. **Geoderma**, v. 354, n. July, p. 113885, 2019b. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113885.

MANJORO, M.; ROWNTREE, K.; KAKEMBO, V.; FOSTER, I.; COLLINS, A. L. Use of sediment source fingerprinting to assess the role of subsurface erosion in the supply of fine sediment in a degraded catchment in the Eastern Cape, South Africa. **Journal of Environmental Management**, v. 194, p. 27–41, 2017. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.07.019.

MARQUES, J. J.; SCHULZE, D. G.; CURI, N.; MERTZMAN, S. A. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 121, n. 1–2, p. 31–43, 2004. doi: 10.1016/j.geoderma.2003.10.003.

MARUYAMA, Y.; OGAWA, K.; OKADA, T.; KATO, M. Laboratory experiments of particle size effect in X-ray fluorescence and implications to remote X-ray spectrometry of lunar regolith surface. **Earth, Planets and Space**, v. 60, n. 4, p. 293–297, 2008. doi: 10.1186/BF03352794.

MATIAS, S. S. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SIQUEIRA, D. S. Ferramentas matemáticas, suscetibilidade magnética e modelos de paisagem aplicados na delimitação de áreas de manejo específico. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 4, p. 968–980, 2015. doi: 10.1590/01000683rbcS20140638.

MATIAS, S. S. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Modelos de paisagem e suscetibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 1, p. 93–103, 2013. doi: 10.1590/S1983-40632013000100003.

MCBRATNEY, A. B.; DE GRUIJTER, J. J. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades. **Journal of Soil Science**, v. 43, n. 1, p. 159–175, 1992. doi: 10.1111/j.1365-2389.1992.tb00127.x.

MCCONNACHIE, J. L.; PETTICREW, E. L. Tracing organic matter sources in riverine suspended sediment: Implications for fine sediment transfers. **Geomorphology**, v. 79, n. 1–2, p. 13–26, 2006. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.09.011.

MONTANARELLA, L.; PENNOCK, D. J.; MCKENZIE, N.; BADRAOUI, M.; CHUDE, V.; BAPTISTA, I.; MAMO, T.; YEMEFACK, M.; AULAKH, M. S.; YAGI, K.; HONG, S. Y.; VIJARNORN, P.; ZHANG, G. L.; ARROUAYS, D.; BLACK, H.; KRASILNIKOV, P.; SOBOCKÁ, J.; ALEGRE, J.; HENRIQUEZ, C. R.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; TABOADA, M.; ESPINOSA-VICTORIA, D.; ALSHANKITI, A.; ALAVIPANAH, S. K.; MUSTAFA ELSHEIKH, E. A. El; HEMPEL, J.; ARBESTAIN, M. C.; NACHTERGAELE, F.; VARGAS, R. World's soils are under threat. *Soil*, v. 2, n. 1, p. 79–82, 2016. doi: 10.5194/soil-2-79-2016.

MONTGOMERY, D. R. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 104, n. 33, p. 13268–13272, 2007. doi: 10.1073/pnas.0611508104.

MOREIRA, F. M. de S.; CARES, J. E.; ZANETTI, R.; STURMER, S. L. *O ecossistema solo*. Lavras-MG. Editora UFLA, 2013.

MOUKARIKA, A.; O'BRIEN, F.; COEY, J. M. D.; RESENDE, M. Development of magnetic soil from ferroan dolomite. v. 18, n. 11, p. 2043–2046, 1991.

MULLINS, C. E. Magnetic Susceptibility of the Soil and Its Significance in Soil Science – a Review. *Journal of Soil Science*, v. 28, n. 2, p. 223–246, 1977. doi: 10.1111/j.1365-2389.1977.tb02232.x.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; DE AQUINO, R. E.; DE FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; DA CUNHA, J. M. Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 39, n. 3, p. 668–681, 2015. doi: 10.1590/01000683rbc20140496.

PEINADO, F. M.; RUANO, S. M.; GONZÁLEZ, M. G. B.; MOLINA, C. E. A rapid field procedure for screening trace elements in polluted soil using portable X-ray fluorescence (PXRF). *Geoderma*, v. 159, n. 1–2, p. 76–82, 2010. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.06.019.

POGGERE, G. C.; INDA, A. V.; BARRÓN, V.; KÄMPF, N.; DE BRITO, A. D. B.; BARBOSA, J. Z.; CURTI, N. Maghemite quantification and magnetic signature of Brazilian soils with contrasting parent materials. *Applied Clay Science*, v. 161, n. December 2017, p. 385–394, 2018. doi: 10.1016/j.clay.2018.05.014.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos Avancados*, v. 22, n. 63, p. 43–60, 2008. doi: 10.1590/s0103-40142008000200004.

PULLEY, S.; COLLINS, A. L.; VAN DER WAAL, B. Variability in the mineral magnetic properties of soils and sediments within a single field in the Cape Fold mountains, South Africa: Implications for sediment source tracing. *Catena*, v. 163, n. December 2017, p. 172–183, 2018. doi: 10.1016/j.catena.2017.12.019.

PULLEY, S.; FOSTER, I.; COLLINS, A. L. The impact of catchment source group

classification on the accuracy of sediment fingerprinting outputs. **Journal of Environmental Management**, v. 194, p. 16–26, 2017. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.04.048.

QUINTON, J. N.; SMITH, R. E. Modelling Soil Erosion by Water. **Modelling Soil Erosion by Water**, n. May 2019, 1998. doi: 10.1007/978-3-642-58913-3.

RESENDE, M. **Aplicação de conhecimentos pedológicos à conservação de solos**. Belo Horizonte: Informe Agropecuário, 1985.

RESENDE, M.; ALLAN, J.; COEY, J. M. . The magnetic soils of Brazil. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 78, p. 322–326, 1986.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S. B.; CORRÊA, G. F.; KER, J. C. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 6ª edição ed. Lavras-MG: Editora UFLA, 2014.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; SILVA, S. H. G. **Da rocha ao solo: enfoque ambiental**. Lavras-MG: Editora UFLA, 2019.

RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; GUILHERME, L. R. G. Aplicações da fluorescência de raios-X portátil (pXRF) na Ciência do Solo tropical. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 3, p. 245–254, 2017. doi: 10.1590/1413-70542017413000117.

RIBEIRO, M. R.; GALINDO, I. C. de L.; JACOMINE, P. K. T.; RIBEIRO FILHO, M. R. Classe de solo como determinantes do uso, do manejo e da conservação do solo e da água: Princípios e fatores. In: **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. 1. ed. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 121–162.

ROCHA, J. S. M.; DALTROZO, C. C. Florestamentos compensatórios para retenção de água em microbacias. **Educação Agrícola Superior**, v. 23, p. 71–75, 2008.

ROSAS, M. A.; GUTIERREZ, R. R. Assessing soil erosion risk at national scale in developing countries: The technical challenges, a proposed methodology, and a case history. **Science of the Total Environment**, v. 703, p. 135474, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135474.

ROYALL, D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena**, v. 46, n. 1, p. 15–34, 2001. doi: 10.1016/S0341-8162(01)00155-2.

ROYALL, D. Particle-size and analytical considerations in the mineral-magnetic interpretation of soil loss from cultivated landscapes. **Catena**, v. 57, n. 2, p. 189–207, 2004. doi: 10.1016/j.catena.2003.08.001.

ROYALL, D. A comparison of mineral-magnetic and distributed RUSLE modeling in the assessment of soil loss on a southeastern U.S. cropland. **Catena**, v. 69, n. 2, p. 170–180, 2007. doi: 10.1016/j.catena.2006.06.001.

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated development environment for R.**, 2016.

SABER, D.; MAURO, D.; SIRIVEDHIN, T. Environmental forensics investigation in sediments near a former manufactured gas plant site. **Environmental Forensics**, v. 7, n. 1, p. 65–75, 2006. doi: 10.1080/15275920500506881.

SAHRAOUI, H.; HACHICHA, M. Effect of soil moisture on trace elements concentrations. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, v. 9, n. 1, p. 468–484, 2017.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: **Erosão e conservação dos solos**. 10^a edição ed. São Paulo: Bertrand Brasil, 1999. p. 340.

SANTOS, H. L.; JÚNIOR, J. M.; MATIAS, S. S. R.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 4, p. 710–716, 2011. doi: 10.5039/agraria.v6i4a1347.

SANTOS, P. C.; SANT’OVAIA, H.; ESPINHA MARQUES, J. Estudo da suscetibilidade magnética em solos contaminados pela extração mineira de São Pedro da Cova. **Comunicacoes Geologicas**, v. 101, p. 1067–1071, 2014.

SCHAETZL, R. J.; ANDERSON, S. **Soil: Genesis and Geomorphology**. First ed. New York: Cambridge University Press, 2005.

SILVA, A. R.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S. Suscetibilidade magnética do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2009.

SILVA, F. M.; WEINDORF, D. C.; SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; RIBEIRO, B. T.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Tropical Soil Toposequence Characterization via pXRF Spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 4, p. 1153–1166, 2019. doi: 10.2136/sssaj2018.12.0498.

SILVA, S. H. G.; HARTEMINK, A. E.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; INDA, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Soil weathering analysis using a portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometer in an Inceptisol from the Brazilian Cerrado. **Applied Clay Science**, v. 162, n. December 2017, p. 27–37, 2018. doi: 10.1016/j.clay.2018.05.028.

SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; DE MENEZES, M. D.; CARVALHO, G. S.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Proximal sensing and digital terrain models applied to digital soil mapping and modeling of Brazilian Latosols (Oxisols). **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, 2016. doi: 10.3390/rs8080614.

SILVA, S. H. G.; RIBEIRO, B. T.; GUERRA, M. B. B.; DE CARVALHO, H. W. P.; LOPES, G.; CARVALHO, G. S.; GUILHERME, R. L. G.; RESENDE, M.; MANCINI, M.; CURI, N.; RAFAEL, R. B. A.; CARDELLI, V.; COCCO, S.; CORTI, G.; CHAKRABORTY, S.; LI, B.; WEINDORF, D. C. pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. **Advances in Agronomy**, v. Vol. 167, p. 1–162, 2021.

SILVA, S. H. G.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; MENEZES, M. D. de; GUILHERME, L. R. G.; MOREIRA, F. M. de S.; CURI, N. Multiple linear regression and random forest to predict and map soil properties using data from portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 6, p. 648–664, 2017. doi: 10.1590/1413-70542017416010317.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES, J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, v. 26, n. 4, p. 425–431, 2010. doi: 10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x.

SOUZA JUNIOR, I. G.; DA COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogy and magnetic susceptibility of iron oxides of b horizon of paraná state soils. **Ciencia Rural**, v. 40, n. 3, p. 513–519, 2010. doi: 10.1590/s0103-84782010000300003.

SPENCER, K. L.; SUZUKI, K.; HILLIER, S. The development of rare earth element-labelled potassium-depleted clays for use as cohesive sediment tracers in aquatic environments. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 6, p. 1052–1061, 2011. doi: 10.1007/s11368-011-0377-9.

STOCKMANN, U.; CATTLE, S. R.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis. **Catena**, v. 139, p. 220–231, 2016. doi: 10.1016/j.catena.2016.01.007.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O CONCEITO DE BACIA HIDROGRÁFICA E A IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA PARA O ENTENDIMENTO DA DINÂMICA AMBIENTAL LOCAL. **Uniará**, 2007.

THOMPSON, ROY; OLDFIELD, F. **Environmental Magnetismo**, 1986.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª Edição, ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997.

VERHEIJEN, F. G. A.; JONES, R. J. A.; RICKSON, R. J.; SMITH, C. J. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. **Earth-Science Reviews**, v. 94, n. 1–4, p. 23–38, 2009. doi: 10.1016/j.earscirev.2009.02.003.

WALLING, D. E.; WOODWARD, J. C. Tracing sources of suspended sediment in river basins: a case study of the River Culm, Devon, UK. **Marine & Freshwater Research**, v. 46, n. 1, p. 327–336, 1995. doi: 10.1071/mf9950327.

WANG, Q. B.; HARTEMINK, A. E.; JIANG, Z. D.; JIN, N. X.; SUN, Z. X. Digital soil morphometrics of krotovinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China. **Geoderma**, v. 301, n. July 2016, p. 11–18, 2017. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.04.010.

WEINDORF, D. C.; BAKR, N.; ZHU, Y. **Advances in portable X-ray fluorescence**

(PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. Elsevier, 2014. v. 128.

WEINDORF, D. C.; ZHU, Y.; CHAKRABORTY, S.; BAKR, N.; HUANG, B. Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for environmental quality assessment of peri-urban agriculture. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 1, p. 217–227, 2012a. doi: 10.1007/s10661-011-1961-6.

WEINDORF, D. C.; ZHU, Y.; HAGGARD, B.; LOFTON, J.; CHAKRABORTY, S.; BAKR, N.; ZHANG, W.; WEINDORF, W. C.; LEGORIA, M. Enhanced Pedon Horizonation Using Portable X-ray Fluorescence Spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 2, p. 522, 2012b. doi: 10.2136/sssaj2011.0174.

WILSON, C. G.; PAPANICOLAOU, A. N. T.; DENN, K. D. Partitioning fine sediment loads in a headwater system with intensive agriculture. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, n. 6, p. 966–981, 2012. doi: 10.1007/s11368-012-0504-2.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning.** Washington U.S. Department of Agriculture, 1978.

XIE, S.; DEARING, J. A.; BLOEMENDAL, J. The organic matter content of street dust in Liverpool, UK, and its association with dust magnetic properties. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 2, p. 269–275, 2000. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00209-5.

XIE, S.; DEARING, J. A.; BLOEMENDAL, J.; BOYLE, J. F. Association between the organic matter content and magnetic properties in street dust, Liverpool, UK. **Science of the Total Environment**, v. 241, n. 1–3, p. 205–214, 1999. doi: 10.1016/S0048-9697(99)00346-0.

ZHANG, J.; YANG, M.; ZHANG, F.; TANG, Y.; WANG, X.; WANG, Y. Revealing soil erosion characteristics using deposited sediment sources in a complex small catchment in the wind-water erosion crisscross region of the Chinese Loess Plateau. **Geoderma**, v. 379, n. 26, p. 114634, 2020. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114634.

ZHANG, X. C.; FRIEDRICH, J. M.; NEARING, M. A.; NORTON, L. D. Potential use of rare earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1508–1515, 2001. doi: 10.2136/sssaj2001.6551508x.

ZHANG, X.; WALLING, D. E. Characterizing Land Surface Erosion from Cesium-137 Profiles in Lake and Reservoir Sediments. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, n. 2, p. 514–523, 2005. doi: 10.2134/jeq2005.0514.

ZHAO, G.; MU, X.; HAN, M.; AN, Z.; GAO, P.; SUN, W.; XU, W. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau. **Catena**, v. 149, p. 110–119, 2017. doi: 10.1016/j.catena.2016.09.010.

ZONTA, J. H.; SOFIATI, V.; COSTA, A. G. F.; SILVA, O. R. R. F. da. Práticas de Conservação de Solo e Água. **Circular Técnica 133**, p. 9, 2012.

SEGUNDA PARTE

ARTIGO - Origem dos sedimentos depositados em área de várzea: aplicação de sensores proximais em uma sub-bacia hidrográfica

RESUMO

A erosão é uma das principais causas de degradação do solo e conhecer a origem dos sedimentos e os processos que agravam o problema é um dos objetivos da conservação do solo. Neste sentido, diferentes sensores têm contribuído para o avanço nessas pesquisas, possibilitando a determinação da origem de sedimentos, por exemplo, em bacias hidrográficas, unidades fundamentais na conservação do meio ambiente. Os objetivos deste trabalho foram identificar a origem dos sedimentos depositados em área de várzea de uma sub-bacia hidrográfica utilizando a abordagem do *fingerprinting*, e avaliar dois sensores proximais na identificação das fontes de sedimentos: o espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (pXRF) e o suscetibilímetro. A seleção das variáveis traçadoras dos sedimentos, preconizada pela abordagem do *fingerprinting*, baseou-se no conhecimento pedológico e os elementos selecionados foram Fe, Si, Al, Ti e Zr. A área de contribuição de sedimentos apresenta dois materiais de origem contrastantes, gabbro e granito-gnaiss, sobre os quais se desenvolveram um Latossolo Vermelho Distroférico típico (LV) e um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVA), respectivamente. Na área de contribuição de sedimentos, coletaram-se 35 amostras na camada superficial do solo (0-2 cm), em malha regular de 50 metros. Já na área de deposição, coletaram-se 24 amostras, em malha regular de 7 metros. A determinação das fontes de sedimentos foi realizada por meio da análise estatística de cluster, um algoritmo que classifica objetos em grupos (cluster) de acordo com a similaridade e diferença entre eles, e por meio de variáveis topográficas. Mapas de declividade e de fluxo acumulado foram confeccionados a partir do modelo digital de elevação (MDE) gerados a partir de curvas de nível de um metro de distância vertical. A análise de variáveis topográficas e a análise de cluster indicaram que o PVA, o solo mais suscetível à erosão na bacia, foi o que mais contribuiu como fonte de sedimentos. O pXRF se mostrou sensível para identificar e distinguir diferentes fontes de sedimentos em uma mesma área, fornecendo variáveis mais eficientes na detecção das fontes de sedimentos, mostrando que os elementos traçadores Fe, Si e Al, usados conjuntamente na análise de cluster, se assemelhavam às amostras de PVA. Os resultados apontam para a eficiência e praticidade do uso de sensores proximais na identificação de fonte de sedimentos em sub-bacias hidrográficas, e reforçam a importância de adoção de práticas conservacionistas em solos que se encontram em terrenos acidentados, em especial nos solos mais suscetíveis à erosão, visando a prever, controlar e monitorar os efeitos antrópicos causadores da erosão hídrica à montante e à jusante de sub-bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Suscetibilidade magnética. Fluorescência de raios-X. Conservação do solo. *Fingerprinting*.

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um dos principais problemas que afetam a sustentabilidade dos ecossistemas (MONTGOMERY, 2007), em especial nas regiões tropicais onde as condições de precipitação são mais intensas (ROSAS; GUTIERREZ, 2020). Os sedimentos desprendidos da superfície levam com eles os nutrientes e a fase viva do solo, que se dispersam e se depositam nas partes baixas do relevo. As consequências são as mais diversas, onde se destacam a perda de áreas cultiváveis, perda da fertilidade do solo e consequente aumento dos custos de produção de alimentos, soterramento de áreas produtivas, assoreamento dos reservatórios, lagos e rios com impacto na disponibilidade de água, perda da biodiversidade de plantas e animais, e da capacidade de resiliência dos ecossistemas (MOREIRA et al., 2013).

Embora seja um processo natural, a ação antrópica sem planejamento vem contribuindo para o agravamento desse problema (VERHEIJEN et al., 2009). A maioria das interações do homem com o solo se dá, principalmente, em pequenas unidades agrícolas, em sub-bacias hidrográficas, e encostas. São nelas onde se aplicam todas as práticas, agrícolas ou não, que vão impactar os ecossistemas (TEODORO et al., 2007). Pequenas bacias hidrográficas são as unidades naturais básicas que fundamentam os trabalhos na conservação do meio ambiente, uma vez que têm amplo alcance social e ambiental, e que portanto são importantes para o planejamento estratégico de estados e municípios, para a estruturação de programas de monitoramento ambiental (RESENDE et al., 2014) e também porque constituem as unidades agrícolas que correspondem ao maior conjunto de produtores rurais (TEODORO et al., 2007).

É papel da ciência do solo contribuir para diminuir os efeitos do mau uso do solo e da água, sugerindo planejamento, desenvolvendo técnicas conservacionistas, medindo as perdas de solo, identificando fontes de sedimento e indicando melhores práticas agrícolas. Há décadas a ciência do solo vem contribuindo para mitigar os efeitos da erosão hídrica (ROCHA; DALTROZO, 2008). A unidade básica das pesquisas da conservação do solo e da água é a parcela de erosão. Os dados obtidos por elas alimentam modelos preditivos, e os resultados são extrapolados para maiores áreas, para bacias hidrográficas maiores. No entanto, a coleta dos dados é onerosa, as séries temporais das coletas são muito longas e a extrapolação dos dados gera incertezas (GUZMÁN et al., 2013).

Mais recentemente, os estudos sobre erosão têm desenvolvido outra abordagem para tratar deste problema utilizando traçadores ambientais que permitam identificar a origem dos sedimentos em bacias hidrográficas (BATISTA et al., 2019; AKAYEZU et al., 2020; CHENG et al., 2020; ZHANG et al., 2020). Essa abordagem derivou de estudos de rastreamento de

substâncias e elementos químicos no ambiente, dentre eles, os radionuclídeos de precipitação (ZHANG; WALLING, 2005), os elementos terras-raras (DEASY; QUINTON, 2010), magnetismo do solo (DING et al., 2020) e outros.

A abordagem de rastreamento focada na identificação da fonte de sedimentos em bacias hidrográficas recebe o nome de *fingerprinting* (impressão digital) (GUZMÁN et al., 2013). Os estudos de *fingerprinting* baseiam-se na comparação da composição do sedimento coletado no exutório de uma bacia hidrográfica com a composição dos solos das diferentes áreas à montante, e na aplicação de uma estatística capaz de separá-los e agrupá-los, de acordo com as semelhanças e diferenças entre eles. O algoritmo estatístico Análise de cluster vem sendo utilizado para esta finalidade com bons resultados (WALLING; WOODWARD, 1995; PULLEY; FOSTER; COLLINS, 2017; LIMA et al., 2020). Assim, há possibilidade de identificar as áreas na paisagem que mais têm contribuído como fonte de sedimentos (GUZMÁN et al., 2013). Segundo Zhao et al. (2017), a identificação das fontes de sedimentos permite tomadas de decisões mais assertivas, trazendo mais eficiência à implantação de técnicas de conservação de solo.

A maioria dos estudos que aplica a abordagem do *fingerprinting* se dá em grandes bacias hidrográficas, maiores que 100 ha (GUZMÁN et al., 2013). No entanto esses estudos apresentam alguns problemas importantes que podem gerar incertezas. As grandes distâncias entre os sedimentos coletados no exutório até os demais pontos à montante faz com que os sedimentos passem longos períodos dentro dos cursos d'água ou à margem deles, podendo ocasionar uma descaracterização física e/ou química no sedimento, dificultando a correlação entre os sedimentos da fonte e os sedimentos da mistura coletados no exutório (PULLEY; COLLINS; VAN DER WAAL, 2018). Outro problema é que bacias hidrográficas grandes apresentam maior diversidade de solos originados de diferentes materiais de origem. Isso aumenta a quantidade de amostras e, conseqüentemente, os custos da pesquisa, e também pode dificultar a obtenção de resultados mais assertivos, dada a variabilidade dos solos amostrados. Um outro problema é que as frações mais grosseiras das amostras de sedimentos coletados mais próximos do exutório tendem a ser mais representadas nas misturas do que as frações mais grosseiras das amostras coletadas mais à montante, porque são mais pesadas, o que dificulta seu deslocamento na paisagem (KOITER et al., 2013a). Assim, é possível que aplicar a abordagem do *fingerprinting* em bacias hidrográficas menores seja uma alternativa para resolver esses problemas. A menor área ocasionaria menos amostragem e menor custo da pesquisa, menos descaracterização física e química dos sedimentos, uma vez que o sedimento

fica menos tempo na paisagem, menos classes de solos amostradas, o que diminuiria as incertezas estatísticas.

O desenvolvimento tecnológico das diferentes áreas do conhecimento, permitiu o surgimento de sensores com potencial comprovado de serem utilizados na ciência do solo, dentre eles, o espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (pXRF) e o suscetibilímetro. O pXRF é um sensor portátil embarcado com uma tecnologia que utiliza uma frequência do espectro (o raios-X) para identificar e quantificar os elementos de uma amostra. O princípio dessa tecnologia é que cada elemento tem uma assinatura espectral capaz de ser identificada quando os elementos são expostos à um feixe de raios-X (WEINDORF et al., 2012a). Já o suscetibilímetro é um sensor medidor de magnetismo. Seu princípio é de que alguns elementos ou materiais têm um certo magnetismo capaz de ser quantificado, quando submetido a um campo magnético (JORDANOVA, 2017). Ambos os sensores têm sido muito utilizados na ciência do solo por apresentarem bons resultados (CURI et al., 2017; POGGERE et al., 2018; SILVA et al., 2018; BATISTA et al., 2019; BARBOSA et al., 2021). Esses sensores permitem aos usuários coletarem dados e obterem resultados de forma rápida, ainda no campo, sem destruir as amostras e sem utilizar as substâncias químicas usuais nas análises de laboratório, nocivas ao meio ambiente (RIBEIRO et al., 2017).

São poucos os trabalhos no mundo que utilizam a abordagem de *fingerprinting* em sub-bacias hidrográficas. Utilizaram-se isótopos de nitrogênio e carbono para investigar a variabilidade temporal e espacial da erosão dentro de uma sub-bacia hidrográfica em Harvard USA (FOX; PAPANICOLAOU, 2007), monitorou-se perda de água e carbono orgânico associado a sedimentos em suspensão em parcelas experimentais instaladas numa encosta no noroeste da Venezuela (BELLANGER et al., 2004), analisou-se a variação do magnetismo na camada superficial do solo em uma sub-bacia hidrográfica no noroeste do Alabama USA (ROYALL, 2001), no entanto parece haver uma lacuna em estudos de determinação de fontes de sedimentos em sub-bacias hidrográficas, sem uso de parcelas experimentais, em solos tropicais. Assim, esse trabalho objetivou aplicar a abordagem de *fingerprinting* para identificar a fonte de sedimentos de uma sub-bacia hidrográfica, depositados sobre uma várzea utilizando os sensores pXRF e o suscetibilímetro, comparando ainda a eficiência de cada sensor para esse propósito, com a finalidade de agilizar tomadas de decisão no campo para otimizar o uso da terra e preservar os recursos naturais e as áreas mais sensíveis à degradação. As hipóteses testadas são: i) o solo mais suscetível à erosão hídrica irá contribuir mais como fonte de sedimento; ii) a técnica de *fingerprinting* é bastante robusta em bacias hidrográficas menores

em razão da não descaracterização dos sedimentos erodidos; e iii) o suscetibilímetro será tão eficiente quanto o pXRF na discriminação das fontes de sedimento.

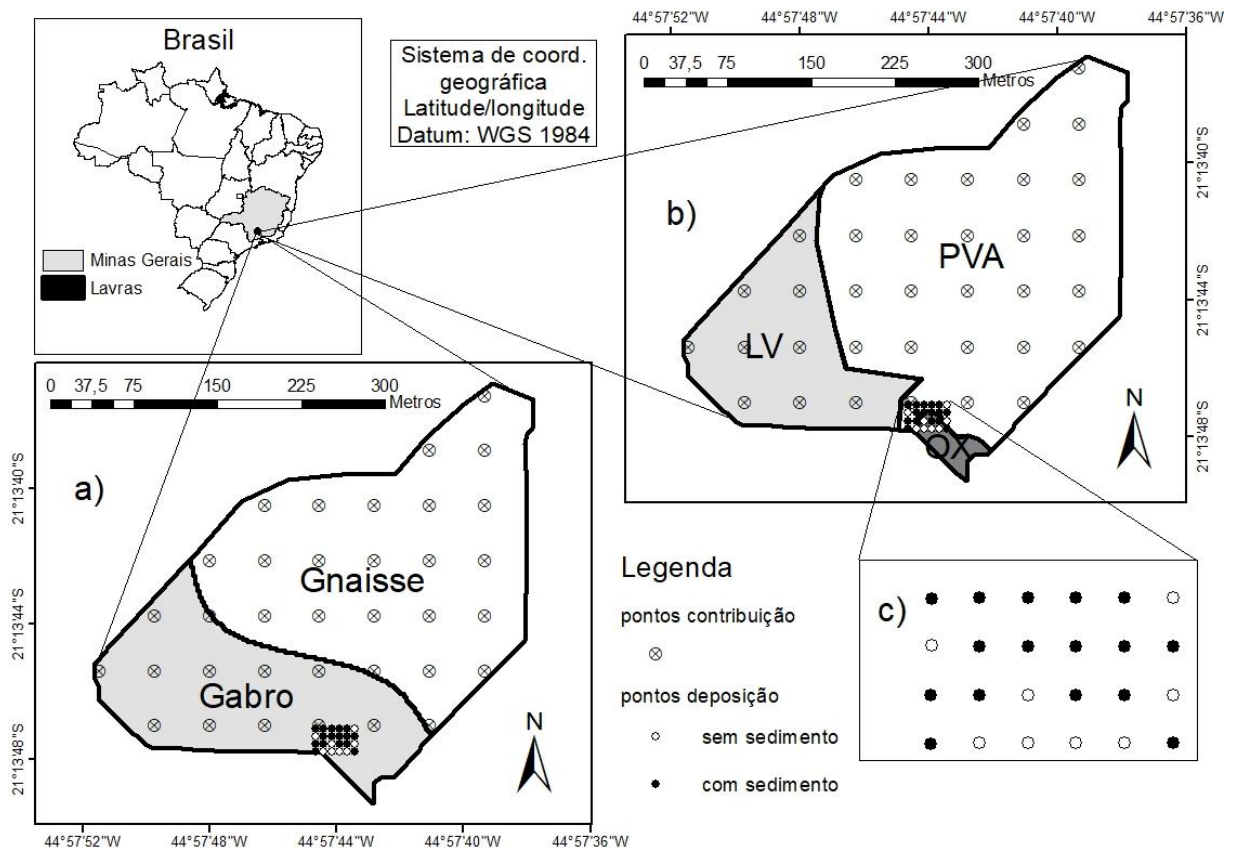
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Este estudo foi realizado em uma sub-bacia hidrográfica, situada *campus* da Universidade Federal de Lavras, estado de Minas Gerais, Brasil, entre as latitudes 7.251.207 m e 7.653.478 m e longitudes 501.962 m e 503.957 m, na Zona 23 K (FIGURA 1).

O clima de Lavras é classificado como Cwa pelo sistema de classificação Köppen, caracterizado por verões chuvosos e quentes e invernos frios e secos, com temperatura média anual de 19 °C e precipitação média anual de 1530 mm (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007). O município se situa na Superfície do Alto Rio Grande, pertencente à unidade geomorfológica do Planalto Atlântico, delimitada ao sul pela serra da Bocaina e ao norte pelo Rio Grande, onde ocorrem áreas sob influência de gnaisses graníticos leucocráticos e mesocráticos, intrusões de gabro e sedimentos aluviais e colúvio-aluviais (CURI et al., 2017).

Figura 1- Área de estudo com os mapas dos materiais de origem (a), adaptado de Mancini et al. (2019); e das classes de solo, PVA – Argissolo Vermelho-Amarelo, LV – Latossolo Vermelho (b) e OX – Organossolo Háplico, adaptado de Curi et al. (2017), ambos com os pontos de amostragem, e os pontos com e sem sedimentos na área de deposição (c), localizada no *Campus* da UFLA, em Lavras MG, Brasil.



A sub-bacia tem 8,71 ha em formato de anfiteatro, onde foram identificadas as áreas de contribuição e de deposição de sedimentos. A litologia da área de contribuição de sedimentos é constituída de dois materiais de origem contrastantes: gabro e granito-gnaiss (MANCINI et al., 2019b) (FIGURA 1a). O gabro é uma rocha ígnea, intrusiva, menos resistente ao intemperismo que o gnaiss devido à sua constituição ser basicamente de minerais máficos. Já o granito-gnaiss é uma rocha metamórfica, mais resistente ao intemperismo por ser constituído de mais minerais félsicos (RESENDE et al., 2019).

Na área de estudo, de acordo com Curi et al. (2017), desenvolveu-se um Latossolo Vermelho Distroférrico típico (LV) sobre o gabro, e um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVA) sobre o granito-gnaiss, com limites ligeiramente desiguais devido às diferentes escalas dos mapas de materiais de origem (FIGURA 1a) e de solos (FIGURA 1 b), respectivamente. Na várzea se desenvolveu um Organossolo Háplico Sáprico típico (OX)

(FIGURA 1b), sobre o qual houve a deposição de sedimentos das áreas à montante. A área de contribuição vem sendo destinada à cafeicultura à, pelo menos, duas décadas.

2.2 Amostragem e análises laboratoriais

Para coleta das amostras foram utilizadas pá e espátula não metálicos para evitar sua influência na quantificação do magnetismo e na identificação dos elementos pelo sensor pXRF, conforme recomendado por Batista et al. (2019). Coletaram-se 35 amostras simples na área de contribuição de sedimentos (FIGURA 1), em malha regular de 50 m x 50 m, na camada de 0 – 2 cm (camada mais vulnerável à erosão hídrica). Na área de deposição de sedimentos (FIGURA 1c), coletaram-se 24 amostras simples, na camada de sedimento, em malha regular de 7 m x 7 m. Também foram medidas as espessuras da camada de sedimentos depositados sobre o OX (FIGURA 2a), para serem mapeadas. Todas as amostras foram secas ao ar e peneiradas a 2 mm antes de serem submetidas a análises pelo pXRF e suscetibilímetro.

Figura 2- Pontos de amostragem na área de deposição de sedimentos, localizados no Campus da UFLA, em Lavras MG, Brasil. Em a), OX indicando: 1 - horizonte A fraco, 2 - camada de sedimento, e 3 - horizonte hístico. Em b), OX sem camada de sedimento.



O pXRF utilizado foi um Olympus Delta Professional, modelo DPO-6000-C, que possui um ânodo de prata de 50 keV e um detector de silício com 2048 canais. As leituras foram feitas no modo Geochem, sem repetição em um saco plástico de polietileno com cerca de 20 micrômetros de espessura. Os teores elementares foram transformados em porcentagem. Este sensor quantifica os teores de 34 elementos, Al, Fe, Si, Mg, Ti, Ca, P, Cr, S, Cl, V, Zr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Nb, Sr, Pb, As, Y, Rb, Sn, Bi, Th, Co, Se, Mo, Ag, Sb, W, Hg e U, no entanto, os elementos Co, Se, Mo, Ag, Sb, W, Hg e U apresentaram teores abaixo do nível de detecção foram desconsiderados.

Análises de suscetibilidade magnética (SM) foram realizadas com um suscetibilímetro Bartington MS2. As amostras foram medidas em baixa frequência (0,47 kHz), e seus valores da SM foram obtidos pela razão entre a leitura do sensor e a massa, em gramas, da amostra medida (DEARING, 1994).

2.3 Seleção dos elementos traçadores

Para os dados do pXRF, foi feita uma pré-seleção dos elementos traçadores. Nela, foram selecionados elementos reportados como marcadores de materiais de origem (RESENDE et al., 2014; STOCKMANN et al., 2016; BATISTA et al., 2019; MANCINI et al., 2019b). Também se realizou um processamento sem pré-seleção, utilizando todos os elementos detectados pelo sensor, conforme também realizado por Marques et al. (2004).

Fe e Si foram selecionados por serem elementos com teores contrastantes nos dois materiais de origem, com maior presença de Fe no gabro, e do Si no granito-gnaiss, com esses teores sendo ainda refletidos nos solos derivados desses materiais de origem (MANCINI et al., 2019b; RESENDE et al., 2019). O Al foi selecionado pelo fato de, assim como o Fe, se concentrar residualmente nos solos na forma de óxidos de Fe e Al, principalmente nos Latossolos, decorrente da dessilicação (RESENDE et al., 2019). Ti e Zr são elementos imóveis no solo e presentes em minerais resistentes ao intemperismo (KOITER et al., 2013), tendendo a permanecer com teores muito próximos ao do material de origem, independente do seu grau de intemperismo (MARQUES et al., 2004). Assim, os elementos selecionados foram: Fe, Si, Al, Ti e Zr.

Além desses elementos, foi utilizada a SM para auxiliar na caracterização e diferenciação dos sedimentos, em razão de sua comprovada eficiência em outros trabalhos (MULLINS, 1977; SIQUEIRA et al., 2010; CAMARGO et al., 2014; CURI et al., 2017).

2.4 Processamentos e análises estatísticas

A identificação da área que mais contribuiu como fonte de sedimento se deu por meio da análise do relevo e pela análise estatística de cluster. A análise da contribuição do relevo foi realizada com mapas de declividade e de fluxo acumulado, gerados no software SAGA GIS (CONRAD et al., 2015). Foi utilizado curvas de nível de um metro de distância vertical para

construir modelos digitais de elevação de 10 m de resolução espacial para o mapa de relevo, e de 1 m de resolução para o mapa de fluxo acumulado.

A análise de cluster foi a estatística usada para separar e classificar as amostras em grupos de acordo com as semelhanças e diferenças entre os traçadores selecionados (WALLING; WOODWARD, 1995; PULLEY; FOSTER; COLLINS, 2017; LIMA et al., 2020). O método utilizado foi o K-means, descrito em Hartigan (1975) e McBratney e De Grujter (1992). O algoritmo requer, como entrada, uma matriz de M pontos, em N dimensões, e uma matriz de K centros de cluster iniciais. Os pontos M são divididos em grupos K, de maneira que a soma dos quadrados dentro do grupo seja minimizada. O algoritmo encontra soluções ótimas, de modo que nenhum movimento de um ponto de um cluster para outro reduz a soma dos quadrados dentro do cluster (HARTIGAN; WONG, 2012). A análise foi realizada no software *RStudio* (RSTUDIO TEAM, 2016) com o pacote *Caret* (KUHNS et al., 2020). Os parâmetros foram: K = 3, iter.max = 10, nstart = 50. Os resultados foram trabalhados no software ArcGIS 10.3 (ESRI) para geração dos mapas.

Realizaram-se as análises de cluster com diferentes combinações entre os elementos selecionados como, por exemplo, Fe e Si; Fe, Si e Al; Si e Al; todos os elementos; todos os elementos e SM, entre outras. Os elementos Ti e Zr foram analisados agrupados com outros elementos, separados de outros elementos e também na relação entre ambos (Ti/Zr). Os resultados dos agrupamentos das análises de cluster foram confrontados com a informação coletada no campo sobre a presença ou não de sedimentos na área de deposição (FIGURA 2). A validação das análises de cluster se deu pela capacidade delas de identificarem os pontos em que não havia sedimentos, e agrupá-los em um cluster diferente dos clusters classificados como sendo de sedimentos oriundos do LV ou do PVA. Dos 24 pontos amostrados na área de deposição, oito não apresentaram camada de sedimento (FIGURA 1c). Calculou-se o volume de sedimento depositado de LV e PVA com os dados interpolados da altura da camada de sedimento e com os dados da análise de cluster que obteve o melhor resultado, com o software ArcGIS 10.3 (ESRI).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Elementos traçadores

Os teores dos elementos obtidos com o pXRF para os traçadores ambientais selecionados e a SM, foram agrupados segundo as classes de solo (CURI et al., 2017) presentes na área de estudo, LV e PVA (CURI et al., 2017). A partir desse agrupamento foram identificados os valores máximos, médios e mínimos de cada uma das classes (TABELA 1).

Tabela 1- Teores dos elementos selecionados como traçadores obtidos pelo sensor pXRF e valores da SM das amostras obtidas na área de contribuição de sedimentos de uma sub-bacia hidrográfica localizada no *Campus* da UFLA, em Lavras, MG.

	Latossolo Vermelho (LV)			Argissolo Vermelho Amarelo (PVA)		
	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo
Al (%)	14.61	12.36	10.50	16.91	13.68	10.79
Fe (%)	14.60	11.73	7.93	10.51	7.38	4.97
Si (%)	7.28	6.14	4.72	13.06	8.53	6.02
Ti (%)	0.73	0.61	0.48	0.71	0.58	0.42
Zr (%)	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
SM ($10^{-7} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	81.42	63.28	27.25	59.35	20.52	5.46

SM – suscetibilidade magnética

Na Tabela 1, nota-se que os valores máximos, médios e mínimos de Fe, Ti e SM foram maiores nas amostras do LV derivado do gabro do que em PVA derivado do granito-gnaise. Os maiores valores para o Fe, Ti e para a SM no LV estão correlacionados positivamente e associados ao material de origem e ao maior intemperismo desse solo em relação ao PVA.

O gabro é uma rocha básica, de origem magmática, intrusiva, constituída de minerais máficos que, como tal, apresenta naturalmente altos teores de Fe resultantes dos minerais silicatados, como olivinas, piroxênios, hornblendas e que, por vezes, apresentam óxidos de titânio (TiO_2) (COSTA et al., 2014; CARVALHO FILHO et al., 2015). Além disso, as rochas intrusivas sofrem resfriamento lento, e nesse processo ocorre maior enriquecimento de Ti (ilmenita) e de Fe (magnetita ou hematita). Existe uma vasta literatura que corrobora com os altos teores de Fe, em todas suas formas, em rochas básicas de origem magmática (HURLBUT; KLEIN, 1985; DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 1992; FABRIS et al., 1997; CAMÊLO et al.,

2017). Segundo Jordanova (2017), o material de origem do solo influencia fortemente seu magnetismo que geralmente é dominado pela presença de pequenas quantidades de óxidos ferrimagnéticos, como o mineral primário magnetita (Fe_3O_4), e os minerais secundários maghemita (Fe_2O_3), titanomagnetitos ($\text{Fe}_2 \times \text{Ti}_x\text{O}_4$) e, mais raramente, pirotita (Fe_3S_4). Essa constatação corrobora com os achados de Kämpf e Curi (2000), que relatam que alguns solos derivados de rochas magmáticas, apresentam magnetização espontânea, causada pela presença de minerais ferrimagnéticos, como a magnetita (Fe_3O_4), na fração areia e silte, e a maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), na fração argila.

A maghemita é um mineral muito comum em solos tropicais e, em solos brasileiros altamente intemperizados, pode ser herdada do material de origem ou pela oxidação da magnetita (CURI; FRANZMEIER, 1984; KÄMPF; CURI, 2000). Costa et al. (1999) relataram que em solos altamente intemperizados e com boas condições de drenagem, como os Latossolos formados a partir de rochas vulcânicas básicas, a maghemita pode constituir até 40% dos óxidos de Fe presentes na fração argila, fazendo dela o principal mineral fonte de magnetismo nesses solos. Costa et al. (2014) e Carvalho Filho et al. (2015), estudando Latossolos desenvolvidos de itabirito no quadrilátero ferrífero, MG, encontraram que quanto maior os teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ no solo, maior é a magnetização na TFSA, a mesma fração estudada neste trabalho. Araujo et al. (2014), analisaram a SM de solos originados de diferentes materiais de origem no sul de Minas Gerais, dentre eles um Latossolo Vermelho derivado de gabro e um Argissolo Vermelho Amarelo derivado de gnaisse, assim como neste trabalho, e observaram grande diferença entre eles, sendo $140 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ para o LV e apenas $3 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ para o PVA, o que corrobora com o presente trabalho. Curi et al. (2017), analisaram solos originados de gabro e gnaisse no campus da UFLA e também encontraram maiores valores médios para o gabro ($193,1 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) do que no gnaisse ($26,7 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), o que também corrobora com nossos achados.

Os resultados do presente trabalho evidenciam que os valores de SM são reflexo dos respectivos materiais de origem e seus teores de óxidos de Fe, assim como também observado por diversos outros autores (RESENDE; ALLAN; COEY, 1986; FABRIS et al., 1997; FONTES et al., 2000; HANESCH; SCHOLGER, 2005; SILVA; SOUZA JUNIOR; COSTA, 2009; LIMA et al., 2015).

Quanto ao Ti, embora este elemento também seja, por vezes, encontrado em solos derivados de gnaisse, como mineral acessório (CURI et al., 2017), os maiores teores encontrados no LV derivado do gabro, deve também estar associado ao maior intemperismo deste solo. Ele é um dos elementos mais resistentes ao intemperismo, e por isso tende a apresentar maiores concentrações residuais em solos altamente intemperizados (MARQUES et

al., 2004). Geralmente os teores de Ti tendem a ser relativamente maiores nos horizontes superficiais devido à resistência ao intemperismo de minerais como rutilo e ilmenita. Na condição de mineral resistente, o Ti é um dos últimos minerais a reagir no solo e, assim, suas concentrações residuais tendem a ser maiores na superfície do solo (SCHAETZL; ANDERSON, 2005). Silva et al. (2018), analisando os teores elementares em perfil de Cambissolo do Cerrado, também constataram essa tendência de teores mais elevados de Ti no horizonte superficial, e os valores encontrados foram muito similares aos do presente trabalho.

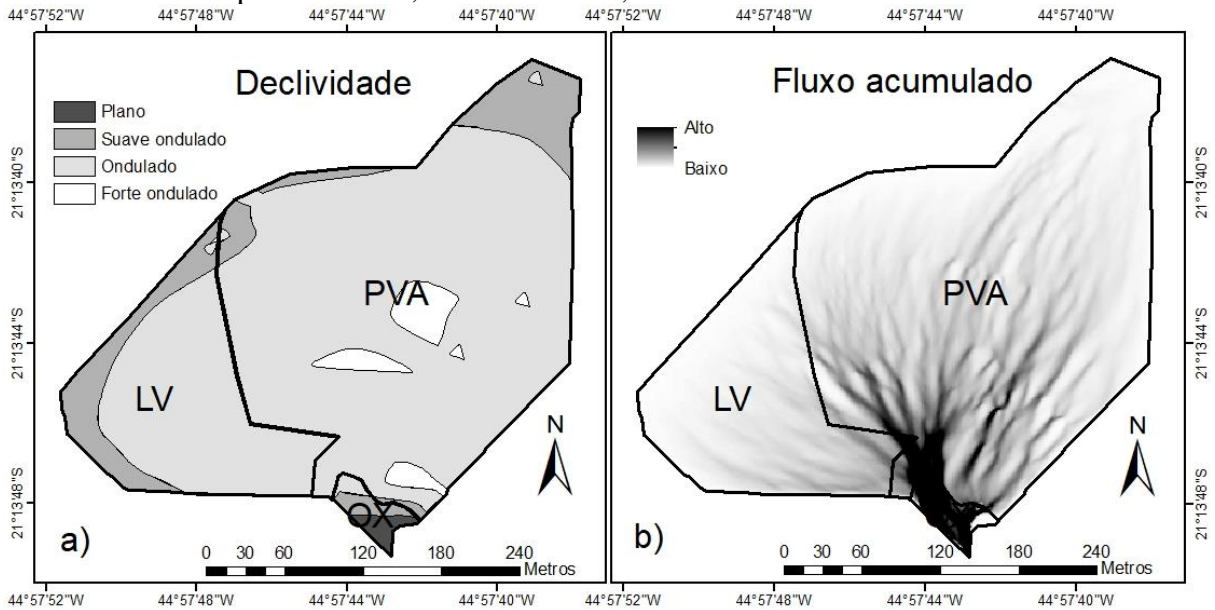
Alguns trabalhos também encontraram correlação entre os maiores teores de Fe e Ti e da SM com a cor avermelhada de solos de origem magmática (SILVA et al., 2016; BARBOSA et al., 2021). Esses resultados também corroboram com as observações de campo e com a literatura, uma vez que LV apresentou cor mais avermelhada, expressando o material de origem gabro, e o PVA apresentou uma cor mais clara, expressando o material de origem granito-gnaiss mesocrático (CURI et al., 2017).

Os teores máximos, médios e mínimos de Al e Si (TABELA 1), foram maiores nas amostras do PVA do que no LV. Os maiores teores desses elementos estão associados ao material de origem, granito-gnaiss, sobre o qual se formou o PVA, uma vez que os minerais félsicos constituintes desse material de origem, como quartzo, feldspatos alcalinos e plagioclásio, são minerais ricos em Si e Al (CURI et al., 2017), e também à caulinita, um argilomineral muito comum em solos intemperizados, formado pelo intemperismo de rochas que contêm minerais silicatados como feldspatos e plagioclásios (RESENDE et al., 2019). Também há correlação entre a cor e os teores de Si no solo, sendo que solos de cores claras tendem a apresentar maiores teores de Si (SILVA et al., 2016). Além disso, no processo de formação dos solos, o Si é um dos elementos mais facilmente lixiviados e, portanto, tende a apresentar teores maiores em solos menos intemperizados (como PVA em relação ao LV), devido à menor ocorrência do processo de dessilicação (KÄMPF; CURI, 2012). Exceção a esse fato é o Si presente em minerais mais resistentes ao intemperismo, como quartzo e moscovita, na fração areia, ou a argilominerais secundários, como a caulinita $(Al, Mg, Fe)_4(Si_4O_{10})$ (KÄMPF; CURI, 2012).

3.2 Análise do relevo

Os mapas da classe de declividade e de fluxo acumulado da área de estudo estão representados na Figura 3.

Figura 3- Mapa de classe de declividade (a) e fluxo acumulado (b) da área de estudo localizada no Campus de UFLA, em Lavras MG, Brasil.



Observando o mapa da classe de declividade (FIGURA 3a), de acordo com a classificação do relevo segundo o IBGE (2017), nota-se que o LV apresentou duas fases do relevo, o suave ondulado (declividade entre 3% e 8%) e, em maior proporção, o relevo ondulado (declividade de 8% a 20%). Já o PVA, além dessas duas classes, também apresentou o relevo forte ondulado, com declividade de 20% a 45%.

A conformação do relevo da área de estudo, corrobora com o mencionado por Resende et al. (2014), onde os autores comentam que os Latossolos, quando em topografia acidentada, apresentam relevo regular, sem discontinuidades, enquanto os solos com B textural apresentam superfície irregular, com discontinuidades e rupturas de declive. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2017), quanto maior a inclinação do terreno, menor a infiltração da água das chuvas, maior escoamento superficial e, conseqüentemente, maior a erosão, mantendo-se as demais condições edafoclimáticas constantes. Amorim et al. (2001), em trabalho sobre a influência da declividade no processo de erosão em um Argissolo, concluíram que a perda de solo por erosão hídrica aumentou, em média, até nove vezes quando a declividade da superfície do solo aumentou de 2 para 18%. Assim, o PVA, por apresentar a fase forte ondulado do relevo

(FIGURA 3a), tende a sofrer mais perdas de solo por erosão hídrica do que o LV e, conseqüentemente, contribuir mais como fonte do sedimento. Já os Latossolos, mesmo quando ocorrem em relevos mais acidentados, são mais resistentes à erosão, uma vez que têm permeabilidade acentuada e alguma coerência entre os grânulos (RESENDE, 1985; RESENDE et al., 2014).

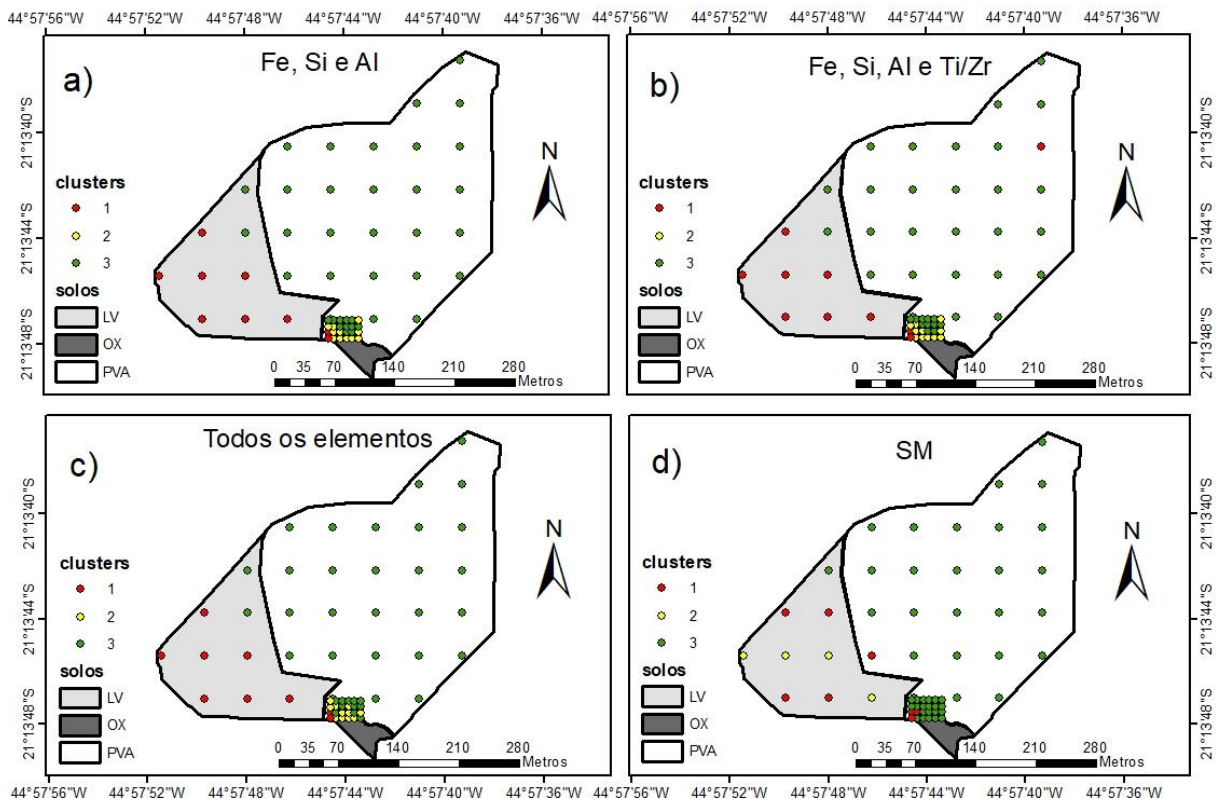
Observando o mapa do fluxo acumulado (FIGURA 3b), nota-se que há um predomínio de canais de drenagem ocorrendo sobre o PVA, quando comparado com a área sobre o LV. A baixa incidência de canais de drenagem sobre o LV (FIGURA 3b) está associada ao maior intemperismo dessa classe de solo, intemperismo que ocasiona solos mais profundos e permeáveis. Os Latossolos estão entre os solos mais desenvolvidos (velhos) da crosta terrestre, e como tais, seus minerais constituintes são os que estão a mais tempo sofrendo transformações químicas e físicas também em profundidade no seu perfil, ocasionando solos mais profundos (RESENDE et al., 2014). A explicação para a maior permeabilidade é que, com a lixiviação da sílica e de outros elementos, há um enriquecimento relativo de óxidos de Fe e Al, que atuam como agentes agregantes, sobretudo a gibbissita, dificultando o ajuste face a face da caulinita. Esse fato, nos estádios mais avançados de desenvolvimento do solo, promove formação de estrutura granular muito pequena dando aspecto poroso à massa do solo, aumentando a macroporosidade e, conseqüentemente, a permeabilidade (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999).

Para o PVA (FIGURA 3b), o predomínio dos canais de drenagem sobre este solo está relacionado à sua baixa capacidade de infiltração de água, decorrente do horizonte A pouco profundo, do horizonte B textural (Bt) com seu maior gradiente textural em relação ao LV, e com o arranjo em bloco entre as partículas do solo. O predomínio de canais de drenagem sobre o PVA, associado à sua baixa capacidade de infiltração, corrobora com Calderano Filho et al. (2014), que concluíram que os Argissolos correspondem a uma das classes de solos mais suscetíveis à erosão, e que isso se deve à sua ocorrência em declividades mais acentuadas, dependendo da região do país, menor profundidade efetiva dos solos, quando comparado ao Latossolo, e que sua maior relação textural no Bt indica um acúmulo de argila em profundidade, o que limita a infiltração de água e favorece um maior deflúvio superficial. Assim, nessas condições, toda a área composta pelo PVA expressou um escoamento superficial mais acentuado (FIGURA 3b). A convergência dos canais de fluxo de água foi determinada pelas características dessa classe de solo que influenciaram o escoamento da água e a formação de sulcos, que se acentuaram no centro da área (FIGURA 3b).

3.3 Análises dos clusters

Os resultados das análises de cluster para os dados do pXRF e para os dados da SM estão representados na Figura 4.

Figura 4- Resultados das análises de cluster com as combinações dos elementos selecionados para determinação das fontes de sedimentos. Os pontos estão plotados sobre o mapa de solos, adaptado de Curi et al. (2017), em Lavras MG, Brasil.



Por meio da análise dos mapas de cluster (FIGURA 4), nota-se que, na área de contribuição de sedimentos, houve uma boa separação das classes de solos, com exceção do mapa de cluster baseado na SM (FIGURA 4d), que considerou o LV como mais de uma classe de solo. Nos demais mapas (FIGURA 4a, 4b e 4c), apenas dois pontos classificados como PVA ficaram na área de LV. Atribui-se esse fato à diferença de escala entre a malha de amostragem deste trabalho, que foi de 50 m x 50 m, e a malha de amostragem do mapa das classes de solo, que foi de 200 m x 200 m (MANCINI et al., 2019b). Dessa forma, o maior detalhamento da amostragem deste trabalho pode incorrer em variações de solos e materiais de origens a menores distâncias, ou em áreas limítrofes.

Para a área de deposição de sedimento (FIGURA 1c), quando confrontados os quatro mapas da Figura 4 com a Figura 1c, observa-se que as análises de cluster com os elementos Fe,

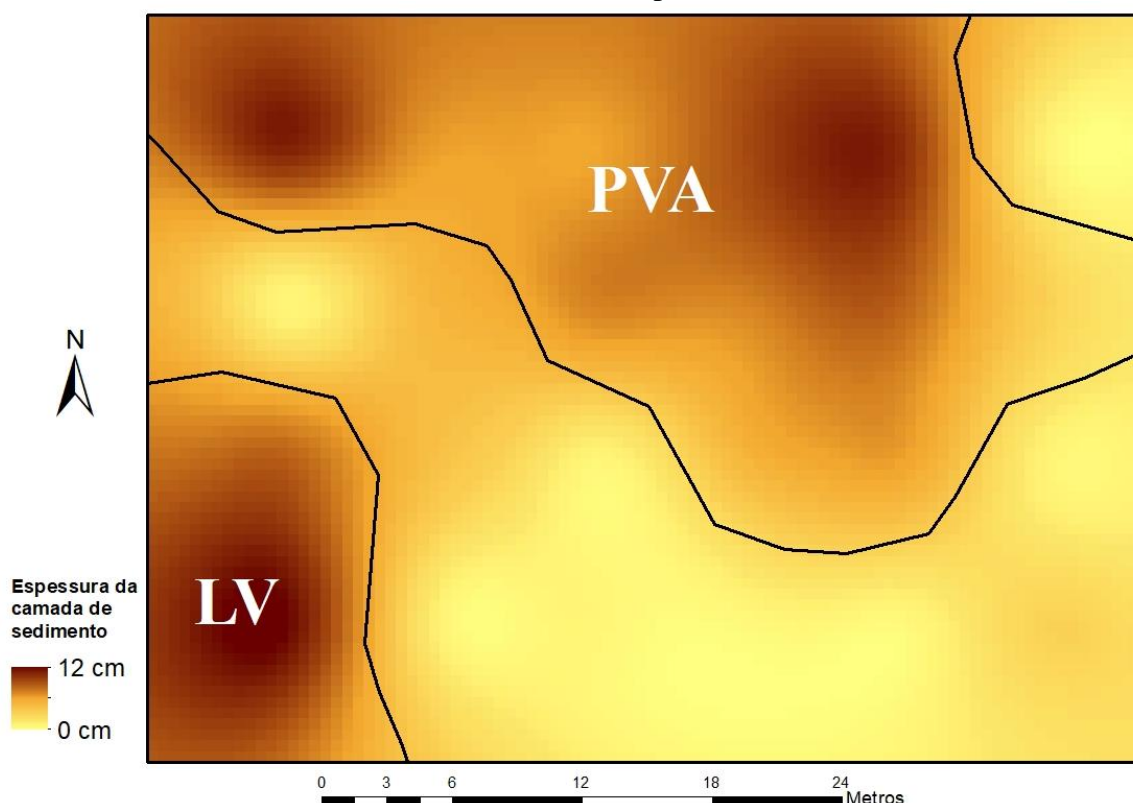
Si e Al (FIGURA 4a), e com os elementos Fe, Si, Al e Ti/Zr (FIGURA 4b), foram as que obtiveram os melhores resultados. Ambas agruparam os 24 pontos exatamente nos mesmos 3 clusters: 11 pontos como sendo de sedimentos oriundos do PVA, dois pontos como sendo de sedimentos oriundos do LV e 11 pontos como sendo de sedimentos oriundos de OX ou da mistura dos materiais (cluster amarelo). Atribuiu-se os melhores resultados a estas duas análises de cluster, porque dentro dos 11 pontos agrupados como sendo de sedimentos oriundos de OX ou da mistura das classes de solo, estão todos os oito pontos em que não havia sedimento aparente e que, portanto, não eram, de fato, nem de sedimentos originados do PVA nem do LV. No entanto, ambas análises erraram os três pontos restantes, uma vez que são pontos em que havia sedimento aparente e, assim, era esperado que eles fossem classificados como sendo de sedimentos originados do PVA ou do LV.

A análise de cluster com todos os 26 elementos (FIGURA 4c) obteve um resultado intermediário. Separou bem as classes de solos na área de contribuição de sedimentos, mas não obteve o melhor resultado na área de deposição de sedimento. Esse procedimento classificou 11 pontos como sendo de sedimentos oriundos do PVA, dois pontos como sendo de sedimentos oriundos do LV e 11 pontos como sendo de sedimentos oriundos de OX ou da mistura de materiais. Dos 11 pontos classificados como sendo de sedimentos oriundos de OX ou da mistura de materiais, sete foram corretamente classificados, uma vez que são pontos em que não havia sedimentos dessas duas classes de solo. Dos 11 pontos classificados como sedimentos oriundos do PVA, em um não havia sedimento e, portanto, deveria ser classificado como pertencente a OX ou à mistura de materiais (cluster amarelo).

A análise de cluster com os dados apenas da SM (FIGURA 4d) foi a que apresentou o pior resultado. Na área de contribuição de sedimentos, ela diferenciou LV e PVA, mas subdividiu o LV. Na área de deposição de sedimentos, classificou 21 pontos como sendo de sedimentos oriundos do PVA e três como sendo de sedimentos oriundos do LV. Não diferenciou nenhum dos oito pontos sem sedimentos (FIGURA 1c), os agrupou com outros 13 pontos com sedimento, e os classificou como sendo do PVA. O pior resultado do suscetibilímetro na discriminação de solos originados de materiais de origem contrastantes é um contrassenso, uma vez que a utilização da SM na identificação de traçadores ambientais é uma das técnicas mais consolidadas (GUZMÁN et al., 2013). O resultado pode estar relacionado à influência da matéria orgânica nas amostras. A amostragem na área de contribuição de sedimento foi feita na camada de 0-2 cm numa área de cultivo de cultura perene com manutenção de cobertura vegetal e, devido a isso, os teores de matéria orgânica foram altos (ver anexo 1 do material complementar). Ao mesmo tempo, a área de deposição de sedimento

está sob uma mata e sobre um OX, onde já há um horizonte A fraco se formando sobre a camada de deposição de sedimento (FIGURA 2a) e, como consequência, os teores de matéria orgânica nas amostras tendem a serem maiores. Esse fato pode ter influenciado uma correlação positiva entre altos teores de matéria orgânica nas amostras da área de contribuição e os altos teores de matéria orgânica nos sedimentos da área de deposição, atrapalhando a diferenciação entre os materiais e, conseqüentemente, a identificação das fontes. Essa hipótese corrobora com Santos, Sant'Ovaia e Espinha Marques (2014) que constataram que a magnetização varia em função da presença de óxidos de ferro, quartzos, calcita e matéria orgânica, sendo que alguns minerais diamagnéticos como o quartzo, a calcita, a ortoclásio e a matéria orgânica, funcionam como atenuantes do sinal magnético. Assim, a constatação desses autores pode ser um indicativo do baixo desempenho do suscetibilímetro, utilizado no modo de baixa frequência, na identificação das fontes de sedimentos.

Figura 5- Mapa da espacialização da camada dos sedimentos que se acumularam na várzea da área de estudo, indicando também as áreas ocupadas pelos sedimentos dos solos LV e PVA no Campus da UFLA, em Lavras MG, Brasil.



O mapa da Figura 5 mostra a distribuição do sedimento ao longo da várzea. As áreas escuras indicam a presença de sedimento e as claras, ausência. Nota-se que ambas as classes de solo contribuíram como fonte de sedimento. No entanto, PVA contribuiu cerca de três vezes

mais do que LV. O volume de sedimentos oriundos de PVA foi 4,397 m³, e do LV foi 1,486 m³. Esse resultado corrobora com os resultados da melhor análise de cluster, que classificou pontos como sendo oriundos dos dois solos, mas com predomínio de PVA. Corrobora também com a análise do relevo, que indicou que a região na paisagem sobre a qual se encontra o PVA é a mais suscetível à erosão hídrica.

Embora tenha havido predomínio de sedimentos oriundo do PVA, o volume de sedimento de LV também foi expressivo. Verificou-se por meio de imagens de satélite pretéritas que até 2014 havia uma estrada de terra que descia em direção à margem esquerda da área de estudo, sobre a região do LV, que terminava a cerca de 150 metros da várzea, e que pode ter contribuído como fonte de sedimento do LV, visto que as estradas são grande fontes contribuintes de sedimento (OLIVEIRA et al., 2010). Seja qual for o motivo da presença de sedimento do LV na várzea, ressalta-se que o sensor pXRF foi sensível para identificar sedimento oriundos de diferentes solos em uma mesma área.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho se aplicou a abordagem de *fingerprinting* utilizando dois sensores proximais para identificar as possíveis fontes de sedimentos depositados em uma várzea. A análise do relevo e a aplicação da análise de cluster com os dados gerados pelos sensores indicaram que a área de PVA foi a que mais contribuiu como fonte de sedimento. A análise de cluster com os elementos traçadores Fe, Si e Al, conjuntamente, se mostrou a mais eficiente na determinação das fontes contribuintes de sedimento do que os outros conjuntos de dados, ou seja, de outros grupos de elementos e da SM. O sensor pXRF foi mais eficiente na detecção das fontes de sedimento do que o susceptímetro utilizado no modo de baixa frequência. O sensor pXRF mostrou-se sensível para identificar diferentes fontes de sedimentos em uma mesma área. Os resultados apontam para a eficiência e praticidade da aplicação da abordagem de *fingerprinting* e do uso de sensores proximais na identificação de fonte de sedimentos.

REFERÊNCIAS

- AKAYEZU, P.; MUSINGUZI, L.; NATUGONZA, V.; OGUTU-OHWAYO, R.; MWATHE, K.; DUTTON, C.; MANYIFIKA, M. Using sediment fingerprinting to identify erosion hotspots in a sub-catchment of Lake Kivu, Rwanda. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 12, 2020. doi: 10.1007/s10661-020-08774-5.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D. da; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. de. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 124–130, 2001. doi: 10.1590/s1415-43662001000100023.
- ARAÚJO, M. A.; PEDROSO, A. V.; AMARAL, D. C.; ZINN, Y. L. Paragênese mineral de solos desenvolvidos de diferentes litologias na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 1, p. 11–25, 2014. doi: 10.1590/S0100-06832014000100002.
- BARBOSA, J. Z.; POGGERE, G.; SILVA, S. H. G.; MANCINI, M.; MOTTA, A. C. V.; MARQUES, J. J. G. de S. e. M.; CURI, N. National-scale spatial variations of soil magnetic susceptibility in Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, n. February, 2021. doi: 10.1016/j.jsames.2021.103191.
- BATISTA, P. V. G.; LACEBY, J. P.; SILVA, M. L. N.; TASSINARI, D.; BISPO, D. F. A.; CURI, N.; DAVIES, J.; QUINTON, J. N. Using pedological knowledge to improve sediment source apportionment in tropical environments. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 9, p. 3274–3289, 2019. doi: 10.1007/s11368-018-2199-5.
- BELLANGER, B.; HUON, S.; VELASQUEZ, F.; VALLÈS, V.; GIRARDIN, C.; MARIOTTI, A. Monitoring soil organic carbon erosion with $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ on experimental field plots in the Venezuelan Andes. **Catena**, v. 58, n. 2, p. 125–150, 2004. doi: 10.1016/j.catena.2004.03.002.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 10ª Edição ed. São Paulo SP: Ícone, 2017.
- BIRD, G.; BREWER, P. A.; MACKLIN, M. G.; NIKOLOVA, M.; KOTSEV, T.; MOLLOV, M.; SWAIN, C. Quantifying sediment-associated metal dispersal using Pb isotopes: Application of binary and multivariate mixing models at the catchment-scale. **Environmental Pollution**, v. 158, n. 6, p. 2158–2169, 2010. doi: 10.1016/j.envpol.2010.02.020.
- CALDERANO FILHO, B.; CARVALHO JÚNIOR, W.; CALDERANO, S. B.; GUERRA, A. J. T. SUSCETIBILIDADE DOS SOLOS À EROSÃO NA ÁREA DE ENTORNO DO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE TOMBOS (MG). **Revista Geonorte, Edição especial 4; V.10; N.10.**, p. 476–481, 2014.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BAHIA, A. S. R. de S. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agrícola**,

v. 71, n. 3, p. 244–256, 2014. doi: 10.1590/S0103-90162014000300010.

CAMÊLO, D. de L.; KER, J. C.; FONTES, M. P. F.; CORRÊA, M. M.; DA COSTA, A. C. S.; MELO, V. F. Pedogenic iron oxides in iron-rich oxisols developed from mafic rocks. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 41, n. January, 2017. doi: 10.1590/18069657rbcS20160379.

CARVALHO FILHO, A. de; INDA, A. V.; FINK, J. R.; CURI, N. Iron oxides in soils of different lithological origins in Ferriferous Quadrilateral (Minas Gerais, Brazil). **Applied Clay Science**, v. 118, n. December, p. 1–7, 2015. doi: 10.1016/j.clay.2015.08.037.

CASHMAN, M. J.; GELLIS, A.; SANISACA, L. G.; NOE, G. B.; COGLIANDRO, V.; BAKER, A. Bank-derived material dominates fluvial sediment in a suburban Chesapeake Bay watershed. **River Research and Applications**, v. 34, n. 8, p. 1032–1044, 2018. doi: 10.1002/rra.3325.

CHENG, Q.; WANG, S.; PENG, T.; CAO, L.; ZHANG, X.; BUCKERFIELD, S. J.; ZHANG, Y.; COLLINS, A. L. Sediment sources, soil loss rates and sediment yields in a Karst plateau catchment in Southwest China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 304, n. May, 2020. doi: 10.1016/j.agee.2020.107114.

COEY, J. M. D.; HINDS, G. Magnetic electrodeposition. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 326, n. 1–2, p. 238–245, 2001. doi: 10.1016/S0925-8388(01)01313-5.

COLLINS, A. L.; PULLEY, S.; FOSTER, I. D. L.; GELLIS, A.; PORTO, P.; HOROWITZ, A. J. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users. **Journal of Environmental Management**, v. 194, p. 86–108, 2017. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.09.075.

COLLINS, A. L.; WALLING, D. E.; MCMELLIN, G. K.; ZHANG, Y.; GRAY, J.; MCGONIGLE, D.; CHERRINGTON, R. A preliminary investigation of the efficacy of riparian fencing schemes for reducing contributions from eroding channel banks to the siltation of salmonid spawning gravels across the south west UK. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 6, p. 1341–1349, 2010. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.02.015.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 7, p. 1991–2007, 2015. doi: 10.5194/gmd-8-1991-2015.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, v. 47, n. 4, p. 466–473, 1999. doi: 10.1346/CCMN.1999.0470408.

COSTA, S. Â. D.; KER, J. C.; SIMÕES, D. F. de F.; FONTES, M. P. F.; FABRIS, J. D.; ANDRADE, F. V. Pedogênese e classificação de latossolos desenvolvidos de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 2, p. 359–371,

2014. doi: 10.1590/S0100-06832014000200001.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. F. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 342–346, 1984.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. F. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 153–158, 1987.

CURI, N.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; MENEZES, M. D. **Mapeamento de solos e magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais**. Lavras-MG: Editora: UFLA, 2017.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1862–1866, 2007. doi: 10.1590/s1413-70542007000600039.

DAWSON, L. A.; HILLIER, S. Measurement of soil characteristics for forensic applications. **Surface and Interface Analysis**, v. 42, n. 5, p. 363–377, 2010. doi: 10.1002/sia.3315.

DEARING, J. Environmental Magnetic Susceptibility. **Interpretation A Journal Of Bible And Theology**, 1999.

DEASY, C.; QUINTON, J. N. Use of rare earth oxides as tracers to identify sediment source areas for agricultural hillslopes. **Solid Earth Discussions**, v. 2, n. 2, p. 195, 2010. doi: 10.5194/sed-2-195-2010.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. Great Britain, 1992.

DING, Z.; ZHANG, Z.; LI, Y.; ZHANG, L.; ZHANG, K. Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns. **Soil and Tillage Research**, v. 199, n. October 2018, p. 104568, 2020. doi: 10.1016/j.still.2019.104568.

FABRIS, J. D.; MUSSEL, W. D. N.; COEY, J. M. D.; DE JESUS FILHO, M. F.; GOULART, A. T. Mg-rich iron oxide spinels from tuffite. **Hyperfine Interactions**, v. 110, n. 1–2, p. 33–40, 1997. doi: 10.1023/A:1012611029591.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 515–524, 1999. doi: 10.1590/s0100-06831999000300004.

FLANAGAN, D. C.; ASCOUGH, J. C.; NEARING, M. A.; LAFLEN, J. M. The Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model. **Landscape Erosion and Evolution Modeling**, n. 1978, p. 145–199, 2001. doi: 10.1007/978-1-4615-0575-4_7.

FONTES, M. P. F.; DE OLIVEIRA, T. S.; DA COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, v. 96, n. 1–2, p. 81–99, 2000. doi: 10.1016/S0016-7061(00)00005-7.

FOX, J. F.; PAPANICOLAOU, A. N. The use of carbon and nitrogen isotopes to study watershed erosion processes. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 4, p. 1047–1064, 2007. doi: 10.1111/j.1752-1688.2007.00087.x.

GATES, W. P. X-ray absorption spectroscopy. In: **Developments in Clay Science**. Elsevier Ltd, 2006. p. 789–864.

GINGELE, F. X.; DE DECKKER, P. Fingerprinting Australia's rivers with clay minerals and the application for the marine record of climate change. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 51, n. 3, p. 339–348, 2004. doi: 10.1111/j.1400-0952.2004.01061.x.

GRANGER, S. J.; BOL, R.; HAWKINS, J. M. B.; WHITE, S. M.; NADEN, P. S.; OLD, G. H.; MARSH, J. K.; BILOTTA, G. S.; BRAZIER, R. E.; MACLEOD, C. J. A.; HAYGARTH, P. M. Using artificial fluorescent particles as tracers of livestock wastes within an agricultural catchment. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 6, p. 1095–1103, 2011. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.12.005.

GUZMÁN, G.; QUINTON, J. N.; NEARING, M. A.; MABIT, L.; GÓMEZ, J. A. Sediment tracers in water erosion studies: Current approaches and challenges. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 4, p. 816–833, 2013. doi: 10.1007/s11368-013-0659-5.

HANESCH, M.; SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, v. 161, n. 1, p. 50–56, 2005. doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02577.x.

HARTIGAN, J. **Clustering Algorithms**. Journal of classification, v2, n. 1, p. 63-76, 1985.

HARTIGAN, J. A.; WONG, M. A. Algorithm AS 136 A K-Means Clustering Algorithm. **Journal of the Royal Statistical Society Series B Methodological**, v. 28, n. 1, p. 100–108, 2012.

HURLBUT, C. S.; KLEIN, C. **Manual of Mineralogy**. Wiley, 1985.

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. 3ª edição. Rio de Janeiro, 2015.

JORDANOVA, N. Magnetism of materials occurring in the environment—Basic overview. **Soil Magnetism**, n. Md, p. 1–28, 2017. doi: 10.1016/b978-0-12-809239-2.00001-2.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de atributos e ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.; SCHAEFER, R., C. E. G. (Eds.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. v1, 2000, p. 107–138.

KÄMPF, N.; CURI, N. **Pedologia fundamentos**. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012.

KANIU, M. I.; ANGEYO, K. H.; MWALA, A. K.; MANGALA, M. J. Direct rapid analysis of trace bioavailable soil macronutrients by chemometrics-assisted energy dispersive X-ray fluorescence and scattering spectrometry. **Analytica Chimica Acta**, v. 729, p. 21–25, 2012. doi: 10.1016/j.aca.2012.04.007.

KOITER, A. J.; LOBB, D. A.; OWENS, P. N.; PETTICREW, E. L.; TIESSEN, K. H. D.; LI, S. Investigating the role of connectivity and scale in assessing the sources of sediment in an agricultural watershed in the Canadian prairies using sediment source fingerprinting. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 10, p. 1676–1691, 2013a. doi: 10.1007/s11368-013-0762-7.

KOITER, A. J.; OWENS, P. N.; PETTICREW, E. L.; LOBB, D. A. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins. **Earth-Science Reviews**, v. 125, p. 24–42, 2013b. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.05.009.

KUHN, M.; WING, J.; WESTON, S.; WILLIAMS, A.; KEEFER, C.; ENGELHARDT, A.; BENESTY, M. Package “caret”. **The R Journal**, v. 223, 2020.

LAIHO, J. V. P.; PERAMAKI, P. Evaluation of portable X-ray fluorescence (PXRF) sample preparation methods. **Special Paper of the Geological Survey of Finland.**, p. 73–82, 2005.

LIMA, P. L. T.; SILVA, M. L. N.; BATISTA, P. V. G.; QUINTON, J.; MAHER, B.; CURI, N. Potencial de uso da susceptibilidade magnética como indicador da erosão hídrica em solos tropicais. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, n. 1, p. 5–8, 2015.

LIMA, P. L. T.; SILVA, M. L. N.; QUINTON, J. N.; ARMSTRONG, A.; INDA, A. V.; BATISTA, P. V. G.; POGGERE, G. C.; CURI, N. Tracing the origin of reservoir sediments using magnetic properties in Southeastern Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 847–864, 2020. doi: 10.5433/1679-0359.2020v41n3p847.

LU, S. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. **Catena**, v. 40, n. 4, p. 359–373, 2000. doi: 10.1016/S0341-8162(00)00092-8.

LU, S. G.; XUE, Q. F.; ZHU, L.; YU, J. Y. Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China. **Catena**, v. 73, n. 1, p. 23–33, 2008. doi: 10.1016/j.catena.2007.08.004.

LU, S. G.; ZHU, L.; YU, J. Y. Mineral magnetic properties of Chinese paddy soils and its pedogenic implications. **Catena**, v. 93, p. 9–17, 2012. doi: 10.1016/j.catena.2012.01.002.

MABIT, L.; BERNARD, C.; LAVERDIÈRE, M. R.; WICHEREK, S. Assessment of soil erosion in a small agricultural basin of the St. Lawrence River watershed. **Hydrobiologia**, v. 410, p. 263–268, 1999. doi: 10.1023/A:1003802602613.

- MAGIERA, T.; STRZYSZCZ, Z.; KAPICKA, A.; PETROVSKY, E. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. **Geoderma**, v. 130, n. 3–4, p. 299–311, 2006. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.02.002.
- MANCINI, M.; WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S.; SILVA, S. H. G.; DOS SANTOS TEIXEIRA, A. F.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Tracing tropical soil parent material analysis via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazilian Cerrado. **Geoderma**, v. 337, n. October 2018, p. 718–728, 2019a. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.10.026.
- MANCINI, M.; WEINDORF, D. C.; SILVA, S. H. G.; CHAKRABORTY, S.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Parent material distribution mapping from tropical soils data via machine learning and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazil. **Geoderma**, v. 354, n. July, p. 113885, 2019b. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113885.
- MANJORO, M.; ROWNTREE, K.; KAKEMBO, V.; FOSTER, I.; COLLINS, A. L. Use of sediment source fingerprinting to assess the role of subsurface erosion in the supply of fine sediment in a degraded catchment in the Eastern Cape, South Africa. **Journal of Environmental Management**, v. 194, p. 27–41, 2017. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.07.019.
- MARQUES, J. J.; SCHULZE, D. G.; CURI, N.; MERTZMAN, S. A. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 121, n. 1–2, p. 31–43, 2004. doi: 10.1016/j.geoderma.2003.10.003.
- MARUYAMA, Y.; OGAWA, K.; OKADA, T.; KATO, M. Laboratory experiments of particle size effect in X-ray fluorescence and implications to remote X-ray spectrometry of lunar regolith surface. **Earth, Planets and Space**, v. 60, n. 4, p. 293–297, 2008. doi: 10.1186/BF03352794.
- MATIAS, S. S. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SIQUEIRA, D. S. Ferramentas matemáticas, suscetibilidade magnética e modelos de paisagem aplicados na delimitação de áreas de manejo específico. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 4, p. 968–980, 2015. doi: 10.1590/01000683rbc20140638.
- MATIAS, S. S. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Modelos de paisagem e suscetibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 43, n. 1, p. 93–103, 2013. doi: 10.1590/S1983-40632013000100003.
- MCBRATNEY, A. B.; DE GRUIJTER, J. J. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades. **Journal of Soil Science**, v. 43, n. 1, p. 159–175, 1992. doi: 10.1111/j.1365-2389.1992.tb00127.x.
- MCCONNACHIE, J. L.; PETTICREW, E. L. Tracing organic matter sources in riverine suspended sediment: Implications for fine sediment transfers. **Geomorphology**, v. 79, n. 1–2, p. 13–26, 2006. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.09.011.

MONTANARELLA, L.; PENNOCK, D. J.; MCKENZIE, N.; BADRAOUI, M.; CHUDE, V.; BAPTISTA, I.; MAMO, T.; YEMEFACK, M.; AULAKH, M. S.; YAGI, K.; HONG, S. Y.; VIJARNSORN, P.; ZHANG, G. L.; ARROUAYS, D.; BLACK, H.; KRASILNIKOV, P.; SOBOCKÁ, J.; ALEGRE, J.; HENRIQUEZ, C. R.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; TABOADA, M.; ESPINOSA-VICTORIA, D.; ALSHANKITI, A.; ALAVIPANAH, S. K.; MUSTAFA ELSHEIKH, E. A. El; HEMPEL, J.; ARBESTAIN, M. C.; NACHTERGAELE, F.; VARGAS, R. World's soils are under threat. *Soil*, v. 2, n. 1, p. 79–82, 2016. doi: 10.5194/soil-2-79-2016.

MONTGOMERY, D. R. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 104, n. 33, p. 13268–13272, 2007. doi: 10.1073/pnas.0611508104.

MOREIRA, F. M. de S.; CARES, J. E.; ZANETTI, R.; STURMER, S. L. *O ecossistema solo*. Lavras-MG. Editora UFLA, 2013.

MOUKARIKA, A.; O'BRIEN, F.; COEY, J. M. D.; RESENDE, M. Development of magnetic soil from ferroan dolomite. v. 18, n. 11, p. 2043–2046, 1991.

MULLINS, C. E. Magnetic Susceptibility of the Soil and Its Significance in Soil Science – a Review. *Journal of Soil Science*, v. 28, n. 2, p. 223–246, 1977. doi: 10.1111/j.1365-2389.1977.tb02232.x.

OLIVEIRA, F. P. De; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; CURTI, N.; LEITE, F. P. Avaliação de perdas de solo em estradas florestais não pavimentadas no Vale do Rio Doce, Minas Gerais Soil loss assessment on unpaved forest roads at the Rio Doce Valley, Minas Gerais state, Brazil. *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 87, p. 331–339, 2010.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; DE AQUINO, R. E.; DE FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; DA CUNHA, J. M. Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 3, p. 668–681, 2015. doi: 10.1590/01000683rbc20140496.

PEINADO, F. M.; RUANO, S. M.; GONZÁLEZ, M. G. B.; MOLINA, C. E. A rapid field procedure for screening trace elements in polluted soil using portable X-ray fluorescence (PXRF). *Geoderma*, v. 159, n. 1–2, p. 76–82, 2010. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.06.019.

POGGERE, G. C.; INDA, A. V.; BARRÓN, V.; KÄMPF, N.; DE BRITO, A. D. B.; BARBOSA, J. Z.; CURTI, N. Maghemite quantification and magnetic signature of Brazilian soils with contrasting parent materials. *Applied Clay Science*, v. 161, n. December 2017, p. 385–394, 2018. doi: 10.1016/j.clay.2018.05.014.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos Avancados*, v. 22, n. 63, p. 43–60, 2008. doi: 10.1590/s0103-40142008000200004.

PULLEY, S.; COLLINS, A. L.; VAN DER WAAL, B. Variability in the mineral magnetic

properties of soils and sediments within a single field in the Cape Fold mountains, South Africa: Implications for sediment source tracing. **Catena**, v. 163, n. December 2017, p. 172–183, 2018. doi: 10.1016/j.catena.2017.12.019.

PULLEY, S.; FOSTER, I.; COLLINS, A. L. The impact of catchment source group classification on the accuracy of sediment fingerprinting outputs. **Journal of Environmental Management**, v. 194, p. 16–26, 2017. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.04.048.

QUINTON, J. N.; SMITH, R. E. Modelling Soil Erosion by Water. **Modelling Soil Erosion by Water**, n. May 2019, 1998. doi: 10.1007/978-3-642-58913-3.

RESENDE, M. **Aplicação de conhecimentos pedológicos à conservação de solos**. Belo Horizonte: Informe Agropecuário, 1985.

RESENDE, M.; ALLAN, J.; COEY, J. M. . The magnetic soils of Brazil. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 78, p. 322–326, 1986.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S. B.; CORRÊA, G. F.; KER, J. C. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 6^a edição ed. Lavras-MG: Editora UFLA, 2014.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; SILVA, S. H. G. **Da rocha ao solo: enfoque ambiental**. Lavras-MG: Editora UFLA, 2019.

RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; GUILHERME, L. R. G. Aplicações da fluorescência de raios-X portátil (pXRF) na Ciência do Solo tropical. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 3, p. 245–254, 2017. doi: 10.1590/1413-70542017413000117.

RIBEIRO, M. R.; GALINDO, I. C. de L.; JACOMINE, P. K. T.; RIBEIRO FILHO, M. R. Classe de solo como determinantes do uso, do manejo e da conservação do solo e da água: Princípios e fatores. In: **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. 1. ed. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 121–162.

ROCHA, J. S. M.; DALTROZO, C. C. Florestamentos compensatórios para retenção de água em microbacias. **Educação Agrícola Superior**, v. 23, p. 71–75, 2008.

ROSAS, M. A.; GUTIERREZ, R. R. Assessing soil erosion risk at national scale in developing countries: The technical challenges, a proposed methodology, and a case history. **Science of the Total Environment**, v. 703, p. 135474, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135474.

ROYALL, D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena**, v. 46, n. 1, p. 15–34, 2001. doi: 10.1016/S0341-8162(01)00155-2.

ROYALL, D. Particle-size and analytical considerations in the mineral-magnetic interpretation of soil loss from cultivated landscapes. **Catena**, v. 57, n. 2, p. 189–207, 2004. doi: 10.1016/j.catena.2003.08.001.

ROYALL, D. A comparison of mineral-magnetic and distributed RUSLE modeling in the assessment of soil loss on a southeastern U.S. cropland. **Catena**, v. 69, n. 2, p. 170–180, 2007. doi: 10.1016/j.catena.2006.06.001.

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated development environment for R.**, 2016.

SABER, D.; MAURO, D.; SIRIVEDHIN, T. Environmental forensics investigation in sediments near a former manufactured gas plant site. **Environmental Forensics**, v. 7, n. 1, p. 65–75, 2006. doi: 10.1080/15275920500506881.

SAHRAOUI, H.; HACHICHA, M. Effect of soil moisture on trace elements concentrations. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, v. 9, n. 1, p. 468–484, 2017.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: **Erosão e conservação dos solos**. 10ª edição ed. São Paulo: Bertrand Brasil, 1999. p. 340.

SANTOS, H. L.; JÚNIOR, J. M.; MATIAS, S. S. R.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 4, p. 710–716, 2011. doi: 10.5039/agraria.v6i4a1347.

SANTOS, P. C.; SANT’OVAIA, H.; ESPINHA MARQUES, J. Estudo da suscetibilidade magnética em solos contaminados pela extração mineira de São Pedro da Cova. **Comunicacoes Geologicas**, v. 101, p. 1067–1071, 2014.

SCHAETZL, R. J.; ANDERSON, S. **Soil: Genesis and Geomorphology**. First ed. New York: Cambridge University Press, 2005.

SILVA, A. R.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S. Suscetibilidade magnética do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, 2009.

SILVA, F. M.; WEINDORF, D. C.; SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; RIBEIRO, B. T.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Tropical Soil Toposequence Characterization via pXRF Spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 4, p. 1153–1166, 2019. doi: 10.2136/sssaj2018.12.0498.

SILVA, S. H. G.; HARTEMINK, A. E.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; INDA, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Soil weathering analysis using a portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometer in an Inceptisol from the Brazilian Cerrado. **Applied Clay Science**, v. 162, n. December 2017, p. 27–37, 2018. doi: 10.1016/j.clay.2018.05.028.

SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; DE MENEZES, M. D.; CARVALHO, G. S.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Proximal sensing and digital terrain models applied to digital soil mapping and modeling of Brazilian Latosols (Oxisols). **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, 2016. doi: 10.3390/rs8080614.

SILVA, S. H. G.; RIBEIRO, B. T.; GUERRA, M. B. B.; DE CARVALHO, H. W. P.;

LOPES, G.; CARVALHO, G. S.; GUILHERME, R. L. G.; RESENDE, M.; MANCINI, M.; CURTI, N.; RAFAEL, R. B. A.; CARDELLI, V.; COCCO, S.; CORTI, G.; CHAKRABORTY, S.; LI, B.; WEINDORF, D. C. pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. **Advances in Agronomy**, v. Vol. 167, p. 1–162, 2021.

SILVA, S. H. G.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; MENEZES, M. D. de; GUILHERME, L. R. G.; MOREIRA, F. M. de S.; CURTI, N. Multiple linear regression and random forest to predict and map soil properties using data from portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 6, p. 648–664, 2017. doi: 10.1590/1413-70542017416010317.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES, J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, v. 26, n. 4, p. 425–431, 2010. doi: 10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x.

SOUZA JUNIOR, I. G.; DA COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogy and magnetic susceptibility of iron oxides of b horizon of paraná state soils. **Ciencia Rural**, v. 40, n. 3, p. 513–519, 2010. doi: 10.1590/s0103-84782010000300003.

SPENCER, K. L.; SUZUKI, K.; HILLIER, S. The development of rare earth element-labelled potassium-depleted clays for use as cohesive sediment tracers in aquatic environments. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 6, p. 1052–1061, 2011. doi: 10.1007/s11368-011-0377-9.

STOCKMANN, U.; CATTLE, S. R.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis. **Catena**, v. 139, p. 220–231, 2016. doi: 10.1016/j.catena.2016.01.007.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O CONCEITO DE BACIA HIDROGRÁFICA E A IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA PARA O ENTENDIMENTO DA DINÂMICA AMBIENTAL LOCAL. **Uniará**, 2007.

THOMPSON, ROY; OLDFIELD, F. **Environmental Magnetismo**, 1986.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª Edição, ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997.

VERHEIJEN, F. G. A.; JONES, R. J. A.; RICKSON, R. J.; SMITH, C. J. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. **Earth-Science Reviews**, v. 94, n. 1–4, p. 23–38, 2009. doi: 10.1016/j.earscirev.2009.02.003.

WALLING, D. E.; WOODWARD, J. C. Tracing sources of suspended sediment in river basins: a case study of the River Culm, Devon, UK. **Marine & Freshwater Research**, v. 46, n. 1, p. 327–336, 1995. doi: 10.1071/mf9950327.

WANG, Q. B.; HARTEMINK, A. E.; JIANG, Z. D.; JIN, N. X.; SUN, Z. X. Digital soil morphometrics of krotovinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China. **Geoderma**, v. 301, n. July 2016, p. 11–18, 2017. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.04.010.

WEINDORF, D. C.; BAKR, N.; ZHU, Y. **Advances in portable X-ray fluorescence (PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications**. Elsevier, 2014. v. 128.

WEINDORF, D. C.; ZHU, Y.; CHAKRABORTY, S.; BAKR, N.; HUANG, B. Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for environmental quality assessment of peri-urban agriculture. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 1, p. 217–227, 2012a. doi: 10.1007/s10661-011-1961-6.

WEINDORF, D. C.; ZHU, Y.; HAGGARD, B.; LOFTON, J.; CHAKRABORTY, S.; BAKR, N.; ZHANG, W.; WEINDORF, W. C.; LEGORIA, M. Enhanced Pedon Horizonation Using Portable X-ray Fluorescence Spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 2, p. 522, 2012b. doi: 10.2136/sssaj2011.0174.

WILSON, C. G.; PAPANICOLAOU, A. N. T.; DENN, K. D. Partitioning fine sediment loads in a headwater system with intensive agriculture. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, n. 6, p. 966–981, 2012. doi: 10.1007/s11368-012-0504-2.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning**. Washington U.S. Department of Agriculture, 1978.

XIE, S.; DEARING, J. A.; BLOEMENDAL, J. The organic matter content of street dust in Liverpool, UK, and its association with dust magnetic properties. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 2, p. 269–275, 2000. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00209-5.

XIE, S.; DEARING, J. A.; BLOEMENDAL, J.; BOYLE, J. F. Association between the organic matter content and magnetic properties in street dust, Liverpool, UK. **Science of the Total Environment**, v. 241, n. 1–3, p. 205–214, 1999. doi: 10.1016/S0048-9697(99)00346-0.

ZHANG, J.; YANG, M.; ZHANG, F.; TANG, Y.; WANG, X.; WANG, Y. Revealing soil erosion characteristics using deposited sediment sources in a complex small catchment in the wind-water erosion crisscross region of the Chinese Loess Plateau. **Geoderma**, v. 379, n. 26, p. 114634, 2020. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114634.

ZHANG, X. C.; FRIEDRICH, J. M.; NEARING, M. A.; NORTON, L. D. Potential use of rare earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1508–1515, 2001. doi: 10.2136/sssaj2001.6551508x.

ZHANG, X.; WALLING, D. E. Characterizing Land Surface Erosion from Cesium-137 Profiles in Lake and Reservoir Sediments. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, n. 2, p. 514–523, 2005. doi: 10.2134/jeq2005.0514.

ZHAO, G.; MU, X.; HAN, M.; AN, Z.; GAO, P.; SUN, W.; XU, W. Sediment yield and

sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau. **Catena**, v. 149, p. 110–119, 2017. doi: 10.1016/j.catena.2016.09.010.

ZONTA, J. H.; SOFIATI, V.; COSTA, A. G. F.; SILVA, O. R. R. F. da. Práticas de Conservação de Solo e Água. **Circular Técnica 133**, p. 9, 2012.