

UFRRJ

PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO,
LEVANTAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE SOLOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE
UM PROCESSO EROSIVO LINEAR NA
DINÂMICA DO FERRO DO SOLO

Henrique Amorim Machado

2025



ESPECIALIZAÇÃO
Geoprocessamento, levantamento e
interpretação de solos
UFRRJ - UFMG - UFV - UFPA





UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO,
LEVANTAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE SOLOS

AValiação da Área de Influência de um Processo
EROSIVO LINEAR NA DINÂMICA DO FERRO DO SOLO

Henrique Amorim Machado

Sob a Supervisão da Professora
Dra. Helena Saraiva Koenow Pinheiro

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido como requisito parcial para
obtenção do título de **Especialista** em
Geoprocessamento, Levantamento e
Interpretação de Solos.

Seropédica, RJ
Junho de 2025



ESPECIALIZAÇÃO
Geoprocessamento, levantamento e
interpretação de solos
UFRRJ - UFMG - UFV - UFPA



Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M149a Machado, Henrique Amorim, 1989-
Avaliação da área de influência de um processo
erosivo linear na dinâmica do ferro do solo / Henrique
Amorim Machado. - Seropédica, 2025.
30 f.: il.

Orientadora: Helena Saraiva Koenow Pinheiro .
Trabalho de conclusão de curso (Graduação). --
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós
Graduação Lato Sensu em Geoprocessamento, levantamento
e interpretação de solos , 2025.

1. LIDAR. 2. Fluorescência de raios X portátil. 3.
Interpolação espacial. I. Pinheiro , Helena Saraiva
Koenow , 1985-, orient. II Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro. Pós-Graduação Lato Sensu em
Geoprocessamento, levantamento e interpretação de
solos III. Título.

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

É permitida a cópia parcial ou total deste documento, desde que seja citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO, LEVANTAMENTO
E INTERPRETAÇÃO DE SOLOS

Folha de aprovação

HENRIQUE AMORIM MACHADO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi submetido como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos.

TCC APROVADO EM 15 de JULHO de 2025.

Prof.(a) Helena Saraiva Koenow Pinheiro
(Supervisora)

Otávio Augusto Queiroz dos Santos
Instituição UFRRJ

Niriele Bruno Rodrigues
Instituição UFRRJ

RESUMO

Avaliação da área de influência de um processo erosivo linear na dinâmica do ferro do solo

MACHADO, Henrique Amorim. **Avaliação da área de influência de um processo erosivo linear na dinâmica do ferro do solo**. 31f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos). Pró-reitoria de Extensão, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

A erosão é um processo natural de modelagem da superfície terrestre, no entanto, sua intensificação em áreas agrícolas acarreta severas consequências à estrutura e à fertilidade do solo, comprometendo a produtividade e, por extensão, a segurança alimentar global. Entre os fatores que agravam esse processo, destacam-se os solos de textura arenosa e baixos teores de carbono orgânico, que favorecem baixa estabilidade estrutural. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de um processo erosivo linear na geoquímica de um solo arenoso, especialmente em relação à variação espacial do elemento ferro. A área de estudo está situada em uma propriedade agrícola no município de Ituiutaba-MG, inserida em uma formação geológica caracterizada por arenitos de alta porosidade. Os solos predominantes são Latossolos Vermelhos distróficos de textura arenosa, com baixa agregação e suscetibilidade à erosão. O experimento compreendeu o mapeamento detalhado de uma área de 12,5 hectares por meio de sensor LiDAR embarcado em drone, que gerou um modelo digital de terreno (MDT) com resolução espacial de 80 centímetros. Foram coletadas 41 amostras de solo em trincheiras de 30 centímetros de profundidade, processadas e analisadas por fluorescência de raios X em bancada para determinação da concentração de ferro. A análise espacial foi conduzida em ambiente de geoprocessamento, com extração de dados morfológicos como declividade, índice de umidade topográfica (TWI) e variações altimétricas, além da interpolação das concentrações de ferro pelo método de inverso da distância ponderada (IDW). Os resultados indicam que, mesmo com a presença de terraceamento, o escoamento superficial concentrado não foi devidamente controlado, originando uma ravina central com profundidade de até dois metros. Esse processo erosivo linear apresentou impacto direto na redistribuição do ferro no solo: mais de 80% dos pontos localizados a menos de 50 metros da feição erosiva apresentaram queda nos teores desse elemento. A ausência de correlação entre ferro e altitude reforça a hipótese de que a redistribuição é condicionada por fluxos hídricos, e não apenas por processos verticais relacionados à posição topográfica. A análise do índice de umidade topográfica demonstrou que os padrões de drenagem natural foram modificados de forma a concentrar os fluxos na porção central da paisagem. A fraca coesão entre partículas do solo arenoso contribui para esse comportamento, favorecendo o transporte de partículas e a perda de elementos químicos associados. Diante desses resultados, conclui-se que os processos erosivos lineares impactam significativamente a geoquímica do solo, depreciando sua capacidade produtiva. Intervenções de manejo mais integradas com a morfologia da paisagem são urgentes para mitigar os efeitos da erosão sobre a fertilidade e estrutura do solo em sistemas agrícolas tropicais.

Palavras-chave: LIDAR. Fluorescência de raios X portátil. Interpolação espacial.

ABSTRACT

Assessment of the influence area of a linear erosive process on soil iron dynamics

MACHADO, Henrique Amorim. **Assessment of the Influence Area of a Linear Erosive Process on Soil Iron Dynamics**. 31f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos). Pró-reitoria de Extensão, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

Soil erosion is a natural geomorphological process, yet its intensification in agricultural areas causes severe impacts on soil structure and fertility, directly compromising land productivity and, consequently, global food security. Among the factors that exacerbate this process are sandy soil textures and low organic carbon content, which lead to poor aggregate stability. This study aimed to evaluate the influence of a linear erosion process on the geochemistry of sandy soil, with a focus on the spatial variation of iron concentration. The study area is located on an agricultural property in the municipality of Ituiutaba, Minas Gerais, Brazil, within a geological formation composed of highly porous sandstones. The predominant soils are dystrophic Red Latosols with sandy textures and low structural development, making them particularly vulnerable to erosion. A 12.5-hectare area was mapped using a drone equipped with a LiDAR sensor, producing a high-resolution digital terrain model (DTM) with a spatial resolution of 80 centimeters. A total of 41 soil samples were collected from 30-centimeter-deep trenches, processed, and analyzed using bench-top X-ray fluorescence to determine iron concentrations. Spatial data analysis was performed in a GIS environment, extracting morphological variables such as slope, Topographic Wetness Index (TWI), and elevation, along with iron data interpolation using the Inverse Distance Weighted (IDW) method. The results indicate that, despite the presence of terraces, surface runoff was not adequately controlled, leading to the formation of a central gully up to two meters deep. This linear erosive feature directly influenced iron distribution in the soil: over 80% of sampling points located within 50 meters of the gully showed a decrease in iron content. The lack of correlation between iron concentration and altitude supports the hypothesis that iron redistribution is driven by water flow dynamics rather than vertical positional factors. TWI analysis revealed that natural drainage patterns had been altered to concentrate surface runoff in the central portion of the landscape. The weak cohesion among particles in sandy soils contributes to this dynamic, facilitating both particle transport and the loss of chemically associated elements. These findings confirm that linear erosion processes significantly affect soil geochemistry and reduce its productive capacity. Landscape-based land management interventions are urgently needed to mitigate the impacts of erosion on the fertility and structure of tropical agricultural soils.

Keywords: LIDAR. Portable X-ray fluorescence. Spatial interpolation.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1.	Processos Erosivos	3
2.2.	Susceptibilidade Natural e Induzida.....	4
2.3.	Fluorescência de Raios X.....	5
3.	MATERIAL E MÉTODOS	7
3.1.	Caracterização da Área de Estudo.....	7
3.2.	Amostragem, Coleta e Preparo de Amostras.....	7
3.3.	Mapeamento do Micro Relevo	8
3.4.	Análises de Fluorescência de Raios X	8
3.5.	Geoprocessamento	9
3.6.	Estatística	9
4.	RESULTADOS	11
4.1.	Análise Morfológica da Área de Estudo	11
4.2.	Resultados Geoquímicos	13
5.	DISCUSSÃO.....	16
5.1.	Relação do Ferro com as Feições Erosivas na Paisagem	16
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	18
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

1. INTRODUÇÃO

Os processos erosivos são fenômenos comuns à evolução morfológica da superfície e seus impactos podem ser relevantes e frequentemente subestimados. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura- FAO, estima-se que anualmente o planeta perca mais de 75 bilhões de toneladas de solo devido à ação da erosão (PANAGOS, BORELLI e ROBINSON, 2020).

No contexto agrícola esta perda compromete a estrutura e a fertilidade do solo, resultando na diminuição da produtividade das terras cultiváveis, implicando possíveis desdobramentos à segurança alimentar global (LOWERY et al., 1995; RHODES, 2014; NCIIZAH e WAKINDIKI, 2015; NOVARA et al., 2018). As mudanças climáticas em curso podem intensificar este processo a partir da concentração pluviométrica em um curto intervalo temporal, como já observado em climogramas da região sudeste do Brasil (ANACHE et al, 2018; EEKHOUT e DE VENTE, 2022).

Dentre as características pedológicas que potencializam a fragilidade a processos erosivos destacam-se texturas mais arenosas associadas a baixos teores de carbono orgânico (MEYER e HARMON, 1984; NCIIZAH e WAKINDI, 2015). Quando presentes em uma paisagem, estas duas características favorecem a uma menor estabilidade dos agregados e consequente aumento no transporte de material pelo escoamento superficial (BARTHÈS e ROOSE, 2002).

A área de estudo eleita para este projeto se torna um cenário representativo de tais paisagens. Situada no oeste do estado de Minas Gerais no município de Ituiutaba a geologia predominantemente pelítica faz com que os solos originados a partir de tais rochas acabem herdando altos teores de areia em sua granulometria. Tais solos se caracterizam pelo seu baixo teor de carbono orgânico associado às estruturas com grau de desenvolvimento fraco, o que somados a determinadas condições de declive e uso da terra aumentam a fragilidade dos solos frente a processos erosivos.

Embora alguns estudos já tenham descrito a gênese de processos erosivos em solos tropicais, ainda há uma relativa escassez de resultados que avancem na avaliação da área de influência de um processo erosivo linear (TOY; FOSTER; RENARD, 2002; Huang e Hartemink, 2020). Diante do exposto é necessário aprofundar os estudos a partir da sobreposição de ferramentas e técnicas modernas, capazes de produzir informações em nível de detalhe que possam servir bases para futuras generalizações que possam ajudar na formulação de práticas agrícolas mais sustentáveis e na proteção da produtividade a longo prazo.

A problemática envolvida neste trabalho se dedica a elucidar se a instalação de um processo erosivo linear é capaz de influenciar as características químicas e físicas de um solo até quantos metros de sua ocorrência. A hipótese deste trabalho é que as alterações nos padrões de drenagem superficial e subsuperficial da vertente induzam transformações na geoquímica do solo, a partir da mudança em padrões de drenagem e escoamento superficial da água, deteriorando assim sua capacidade produtiva.



Deste modo, a presente pesquisa possui como objetivo geral avaliar o efeito de um processo erosivo linear na alteração do elemento ferro em um solo arenoso. Como objetivos específicos espera-se compreender o papel da água na variação espacial do ferro, a partir dos parâmetros morfológicos do terreno; mensurar a variabilidade espacial de parâmetros químicos do solo com base na interpolação de dados e; elucidar a influência espacial de um processo erosivo sobre áreas agrícolas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Processos Erosivos

A erosão do solo constitui-se como um dos processos de degradação ambiental mais significativos da atualidade, com impactos diretos sobre a produtividade agrícola, os recursos hídricos, a biodiversidade e a estabilidade climática (HURNI et al., 2008; NEARING, 2013). Seu conceito mais basal envolve a remoção da camada superficial do solo por meio de agentes naturais ou antrópicos, superando em muito a sua taxa natural de formação desta camada (Zachar, 2011).

A erosão do solo pode ser classificada em diferentes tipos, conforme o agente causador e as características morfológicas do processo. A erosão hídrica apresenta-se como o tipo mais recorrente e impactante de degradação do solo, ocorrendo predominantemente em regiões de relevo acidentado associados com climas tropicais com chuvas intensas em alguma estação do ano (LABRIÈRE et al., 2015).

Este tipo de erosão pode ser classificado em diferentes estágios conforme a intensidade do escoamento superficial e a profundidade dos canais formados. O primeiro estágio é denominado erosão laminar, caracterizado pela remoção uniforme da camada superficial do solo, quase imperceptível a olho nu, mas extremamente danosa em longo prazo. Embora discreta esta tipologia consegue transportar um grande volume de solo no tempo. Estima-se que em Minas Gerais as taxas de perda do solo podem superar 30 toneladas por hectare por ano (BESKOW, et al., 2009; MAGALHÃES et al., 2012; OLIVEIRA e LEITE, 2018; ROCHA E MAGRI, 2022)

Quando o escoamento da água torna-se concentrado, forma-se a erosão em sulcos, que consiste em pequenos canais visíveis ao longo da superfície do solo, geralmente com poucos centímetros de profundidade. Embora relativamente fáceis de serem corrigidos por práticas agrícolas, os sulcos indicam o início de um processo erosivo mais grave, especialmente quando ocorrem de forma recorrente.

A evolução do processo iniciado em sulcos pode dar origem à formação de ravinas, que são canais mais profundos e largos, formados pela concentração do fluxo hídrico em áreas de maior declividade. As ravinas comprometem significativamente o uso da terra, inviabilizando a mecanização agrícola e aumentando assoreamento de corpos d'água. O desenvolvimento de ravinas em solos brasileiros está em geral associados ao pisoteio do gado em trilheiros, ao estabelecimento de cercas e à não construção de terraços em áreas agrícolas (SPAROVEK; CORRECHEL; BARRETO, 2007; THOMAZ e LUIZ, 2012; GALDINO et al., 2016).

Quando o processo erosivo atinge o lençol freático ou camadas mais profundas e instáveis do solo, formam-se as voçorocas, caracterizadas por cavidades que podem atingir grandes profundidades. Essas estruturas podem se expandir rapidamente, especialmente em solos arenosos, resultando em graves danos à infraestrutura, à biodiversidade e às populações humanas (BACELLAR; NETTO; LACERDA, 2005; VALENTIN; POESE; LI, 2005; SAMPAIO et al., 2016).

As atividades humanas representam um agravante expressivo, sobretudo por meio do desmatamento, do uso inadequado do solo na agricultura, do sobrepastoreio e da expansão urbana desordenada (SHINKANGALAH et al., 2016). Além disso, as mudanças climáticas têm

intensificado eventos extremos, como chuvas intensas e secas prolongadas, exacerbando os efeitos erosivos (LI e FANG, 2016).

As consequências da erosão do solo atingem não somente a propriedade agrícola onde o processo está instalado. Em larga escala a perda dos horizontes superficiais podem comprometer diretamente a produtividade agrícola, podendo colocar determinadas regiões em recessões econômicas ou em insegurança alimentar (PIMENTELe BURGESS, 2013; KUCHER et al, 2021). A degradação dos ecossistemas do solo também afeta a biodiversidade e reduz a capacidade de infiltração e retenção de água, favorecendo a ocorrência de inundações e deslizamentos (LI e WEI, 2014; MAHABALESHWARA e NAGABHUSHAN, 2014). Outra consequência relevante é o assoreamento e a contaminação de corpos hídricos, causados pelo transporte de sedimentos, nutrientes e defensivos agrícolas (ISSAKA e MUHAMMAD, 2017).

Em escala global, cerca de 33% dos solos encontram-se degradados, com projeções alarmantes que indicam a possibilidade desse número mais que duplicar considerando terras agricultáveis apresentando algum grau de degradação até 2050 (GARCÍA RUIZ et al., 2015; BORRELLI et al., 2020; BORRELLI et al., 2021).

No Brasil, a tendência de aumento de solos degradados por processos erosivos também acompanha o cenário global. Merten e Minella (2013) ao estimarem possíveis cenários para a erosão brasileira deduziram que a taxa de erosão passaria de 840 milhões de toneladas de solo por ano para 960 milhões toneladas/ano em 2020.

A erosão do solo representa um desafio complexo e multidimensional, cujas implicações ultrapassam as esferas ambiental e econômica, alcançando também questões sociais e climáticas (BOARDMAN; POESE; EVANS, 2003). A formulação de políticas públicas eficazes, o fortalecimento da fiscalização ambiental e o incentivo à agricultura regenerativa são medidas urgentes para conter o avanço da degradação dos solos.

2.2. Susceptibilidade Natural e Induzida

A vulnerabilidade de um solo aos processos erosivos está ligada às suas características naturais, que influenciam diretamente sua resistência ou fragilidade à ação da água. Entre os fatores determinantes estão suas propriedades físicas, como textura, estrutura, porosidade, densidade aparente e capacidade de infiltração (OWOPUTI e STOLTE, 1995; WANG e SHI, 2015). A granulometria é uma importante variável para compreensão dos processos erosivos. Solos arenosos tendem a apresentar maior erodibilidade, pois têm baixa coesão entre as partículas, permitindo maior desagregação e transporte (HOLZ et al., 2015; WEI e WU, 2015; HUANG e HARTEMINK, 2020).

Por outro lado, solos muito argilosos, embora inicialmente mais coesos, podem apresentar rápida saturação, reduzida infiltração e, conseqüentemente, maior escoamento superficial — condição que favorece a formação de sulcos e ravinas, especialmente em terrenos declivosos (ØYGARDEN et al, 1997; MORGAN, 2009).

A composição coloidal dos solos pode exercer influência na sua estabilidade. Solos com predominância de argilominerais do tipo 2:1 apresentam comportamentos físicos distintos em relação à presença e ausência de água no sistema. Tal característica tem por consequência a expressão de descontinuidades hidráulicas ao longo do perfil, facilitando o escoamento

subsuperficial ou mesmo a rápida saturação da superfície (BEN-HUR e WAKINDIKI, 2004; KASANIN-GRUBIN, 2013).

Todavia, solos com alta presença de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, típicos de regiões tropicais intemperizadas como o Cerrado e partes da Mata Atlântica, tendem a apresentar bons índices de coesão e resistência à erosão. Esses solos, no entanto, quando expostos por desmatamento e uso inadequado, perdem rapidamente a estabilidade superficial, tornando-se também suscetíveis a processos erosivos intensos (FIGUEIREDO; AUGUSTIN; FABRIS, 1999; MENDES et al., 2018).

A presença de matéria orgânica no solo também exerce papel fundamental na resistência aos processos erosivos. A matéria orgânica atua como agente agregante, promovendo a formação de estruturas estáveis que resistem à desagregação provocada pela ação do efeito *splash* e do escoamento superficial (WEI e WU, 2015). Solos ricos em matéria orgânica possuem maior porosidade e infiltração, o que reduz o volume e a velocidade do escoamento superficial, diminuindo o risco de formação de sulcos e ravinas (LAL, 2005; YANG et al., 2024).

As características topográficas e geológicas onde o solo está situado também exercem influência direta na gênese e progressão de formas erosivas. Áreas com declividade acentuada favorecem o escoamento concentrado, aumentando a energia cinética da água e, portanto, seu potencial erosivo.

2.3. Fluorescência de Raios X

A fluorescência de raios-X (XRF) é uma técnica analítica altamente eficaz para a caracterização qualitativa e quantitativa de materiais sólidos e líquidos, incluindo solos (ENE, BOSNEAGA e GEORGESCU, 2010; WU et al., 2012; RIBEIRO et al., 2017). A técnica baseia-se na excitação dos átomos presentes no material por radiação de raios-X, o que resulta na emissão de fluorescência característica de cada elemento. Essa radiação emitida é captada por um detector, permitindo a identificação dos elementos presentes e a quantificação de suas concentrações. No estudo de solos, a XRF tem se mostrado uma ferramenta valiosa devido à sua capacidade de analisar diversos elementos químicos em uma única amostra com rapidez e precisão (IMANISHI et al., 2010).

A técnica de XRF opera pela emissão de raios-X de alta energia que incidem sobre a amostra de solo. Quando esses raios atingem os átomos da amostra, ocorre a remoção de um elétron da camada interna do átomo, gerando uma lacuna. Para preencher essa lacuna, um elétron de uma camada externa do átomo faz a transição, liberando energia na forma de radiação fluorescente. Cada elemento químico emite radiação característica em função de sua composição atômica, permitindo a identificação dos elementos presentes e a quantificação das suas concentrações. A intensidade da fluorescência detectada está diretamente relacionada à concentração do elemento na amostra, possibilitando análises de alta precisão.

No campo da ciência do solo, a XRF tem diversas aplicações que envolvem a análise de elementos químicos fundamentais para a compreensão das propriedades e da fertilidade do solo (TOWETT; SHEHERD; CADISCH, 2013; RIBEIRO et al., 2017). Essa técnica é amplamente utilizada para estudar a distribuição de elementos metálicos, como ferro, manganês, cobre e

zinco, essenciais para o crescimento de plantas e para o entendimento das interações entre solo e vegetação (LIMA, et al., 2019; TAVARES, et al., 2023a; TAVARES et al., 2023b). A técnica também é aplicada para investigar a presença de contaminantes, como metais pesados, que podem afetar a qualidade ambiental e a saúde humana (RADY; DIAMOND, 2009). Além disso, a XRF pode ser usada na determinação de elementos de interesse em estudos de pedogênese, oferecendo informações sobre os processos de formação e evolução do solo ao longo do tempo.

Apesar de suas diversas vantagens, a técnica de XRF apresenta algumas limitações. Uma delas é a dificuldade de detecção de elementos com concentrações muito baixas, especialmente quando esses elementos estão presentes em matrizes complexas, como os solos, onde a presença de compostos interferentes pode comprometer a precisão dos resultados (KLOCKENKÄMPER, 2006; OYEDOTUN, 2018). Além disso, a XRF não é capaz de fornecer informações sobre a forma química dos elementos, o que significa que não é possível diferenciar entre diferentes estados de oxidação ou formas químicas de um elemento, o que pode ser relevante em certos estudos ambientais ou agrícolas.

A necessidade de amostras homogêneas também representa uma limitação, já que a precisão da análise depende da preparação adequada da amostra (SILVA, et al., 2018). Em solos com grande variação de composição mineralógica, como solos arenosos e argilosos, é crucial garantir que a amostra representativa seja coletada e analisada para que os resultados sejam confiáveis. Outro ponto a ser considerado é que a XRF não é ideal para a análise de compostos orgânicos presentes no solo, o que pode restringir sua aplicação em alguns tipos de estudos.

O advento da versão portátil da XRF tem ampliado as possibilidades de aplicação dessa técnica, especialmente na agricultura de precisão. A principal vantagem da versão portátil é a possibilidade de realizar medições *in situ*, diretamente no campo, sem a necessidade de transporte das amostras para laboratórios (PELEGRINO et al., 2022). Isso permite uma análise rápida e eficiente das condições do solo em diferentes pontos de uma área agrícola, fornecendo informações valiosas para o manejo agrícola em tempo real.

A aplicação desta técnica em campo tem se mostrado uma ferramenta útil para o monitoramento contínuo das condições do solo ao longo de diferentes épocas do ano, possibilitando ajustes no manejo conforme as variações sazonais e climáticas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo se localiza em uma fazenda pertencente ao assentamento rural “Divisa” ao sul do município de Ituiutaba -MG (Figura 01), entre as coordenadas 661805m E – 7877293m S e 662260m E – 7877030m S.

A litologia local é dominada pelos arenitos de cimentação ferruginosa da Formação Vale do Rio do Peixe de idade cretácea (MILANI et al., 2007). Associado ao contexto geológico da Bacia Sedimentar do Paraná, a área de estudo apresenta relevo plano com declives inferiores a 10% sem grandes alterações relevantes.

Os arenitos desta Formação acabam influenciando na pedogênese local, facilitando o intemperismo a partir da grande porosidade destas rochas e permitindo o aprofundamento do perfil pedológico a espessuras que superam facilmente os 5 metros (Martins e Costa, 2014). De forma geral, os solos da área de estudo se caracterizam como LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos de textura média com teores de argila que raramente ultrapassam 200g.kg^{-1} nos horizontes superficiais (MARTINS e COSTA, 2014).

O solo da área de estudo é caracterizado por ter mais de 2 m de espessura total, apresentando grande homogeneidade morfológica entre os horizontes A e B. A estrutura é sempre em blocos sub angulares que se desfazem em granular com grau fraco de desenvolvimento. A granulometria tem em média 850g.kg^{-1} de areia total e menos de 100g.kg^{-1} de argila, sendo esta composta majoritariamente por hematitas seguidas de goethita e quartzo. Os teores de matéria orgânica raramente ultrapassam 7g.kg^{-1} e se concentram principalmente nos 10 primeiros centímetros de solo. O uso atual é pastagem não manejada a mais de 5 anos, sendo a última intervenção uma calagem seguida de gradagem.

3.2. Amostragem, Coleta e Preparo de Amostras

A partir da delimitação de uma área de estudo com 12,5 ha foram distribuídos 41 pontos amostrais abrangendo todo o espaço delimitado para este estudo (Figura 01). A partir de trincheiras com 30 centímetros de profundidade foram coletadas amostras deformadas de solo utilizando-se faca, sacos plásticos de luvas de nitrila, garantindo que nenhuma contaminação cruzada ocorresse durante esta etapa.

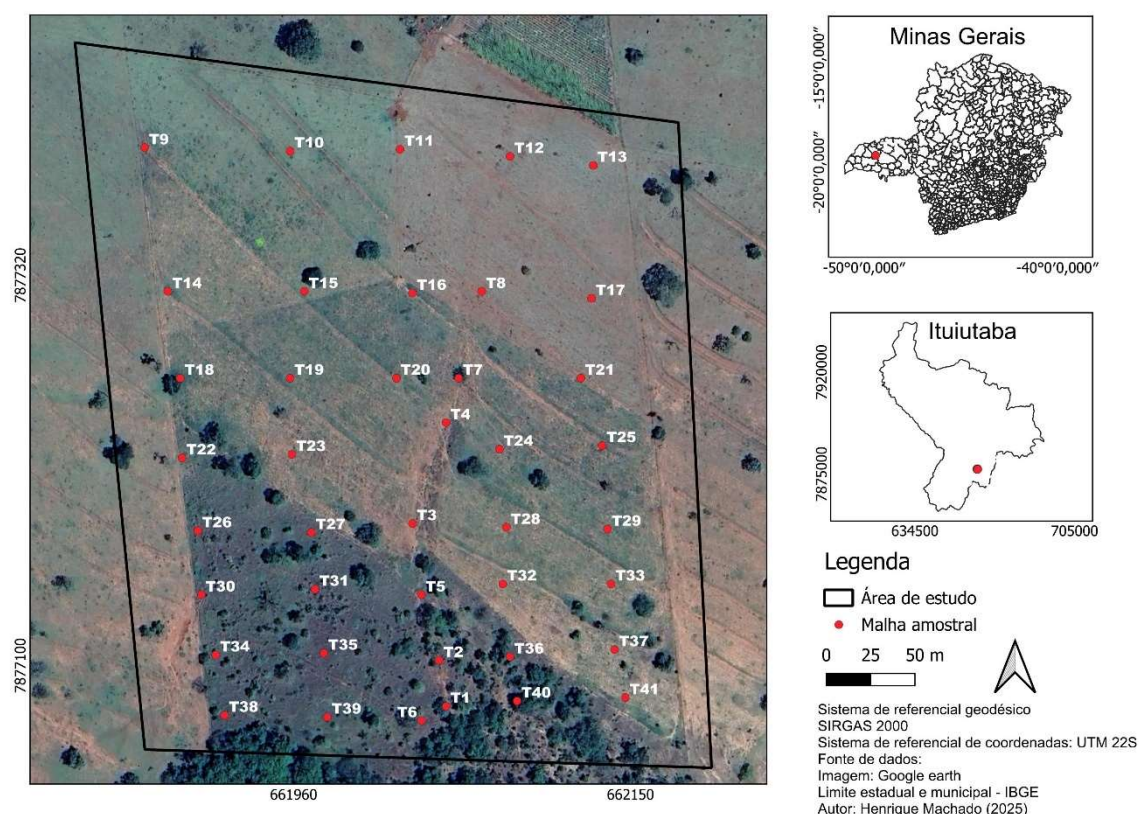


Figura 1 - Mapa de localização da Área de Estudo e dos pontos amostrais
Fonte: autor

Após coletadas, as amostras foram conduzidas para laboratório, onde tiveram sua umidade uniformizada em estufa a 40°C. A granulometria foi selecionada por peneira de 2 mm e posteriormente moída em moinho de disco para obtenção de material com <0,05mm de diâmetro máximo (Silva, et.al, 2018). Os solos preparados foram acondicionados em frascos cilíndricos contendo 2/3 de solo e 1/3 de algodão, permitindo assim que o material fosse comprimido junto a um filme fino de espectro-membrana prolene®.

3.3. Mapeamento do Micro Relevô

Para o mapeamento das feições erosivas foi utilizado a aeronave Matrice 300 acoplada com sensor LIDAR (Light Detection and Ranging) – L1 da marca Dji. Os voos foram realizados durante os meses de agosto a setembro de 2024, seguindo uma altura fixa em relação ao terreno de 100 metros, com 80% de sobreposição lateral e 85% de sobreposição frontal. A correção geométrica foi realizada no software DJI Terra. A nuvem de pontos foi tratada no software Lidar 360 para geração do modelo digital de terreno com resolução espacial de 80 cm. Posteriormente, o Modelo digital de elevação foi analisado em ambiente QGIS.

3.4. Análises de Fluorescência de Raios X

Os cilindros contendo o solo amostrado foram submetidos à análise de fluorescência de raios-X a partir de um equipamento portátil (WILLIAMS; TAYLOR; ORR, 2020; SILVA, et



al., 2021). As leituras foram conduzidas em laboratório, utilizando-se o equipamento Tracer 5G (Bruker, Alemanha) no modo de leitura em bancada, utilizando atmosfera normal durante a leitura. A partir de duas excitações com fonte de Ródio foram obtidos dados de magnésio e urânio refletindo o teor total destes elementos nas amostras. Após tabulação dos dados foram recortados os valores de Fe_2O_3 em g.kg^{-1} , compreendendo estes como a somatória dos teores de ferro disponível somado com o teor estrutural presentes na forma de hematita e goethita.

3.5. Geoprocessamento

As informações geolocalizadas foram tratadas em ambiente SIG a partir do software QGIS versão 3.34.10. Para este trabalho foram extraídos do Modelo Digital do Terreno (MDT) gerado pelo LIDAR o mapa de declividade, índice de umidade topográfica e a interpolação de dados do elemento ferro pela ferramenta IDW.

Para ser realizada a correlação do ferro com os demais componentes do relevo foi extraído um *buffer* de nove metros de cada ponto amostral, considerando esta metragem como um possível erro de localização do GPS utilizado. A partir deste novo polígono foram extraídas as médias de cada variável a partir da ferramenta “estatísticas zonais”.

3.6. Estatística

Os dados foram tabulados e tratados no software JAMOV (The jamovi Project, 2024). Para ser avaliada a relação entre as variáveis foi realizado um teste correlação de Pearson com nível de confiança de 95%. A geoestatística foi conduzida a partir da interface do QGIS a partir do plug-in Smart-Map utilizando os critérios de modelo de ajuste linear com raio de 100m. Posteriormente foi utilizado o complemento SAGA Next Gen para obtenção da interpolação a partir do método Spline, com resolução espacial de 30 metros (Figura 2).

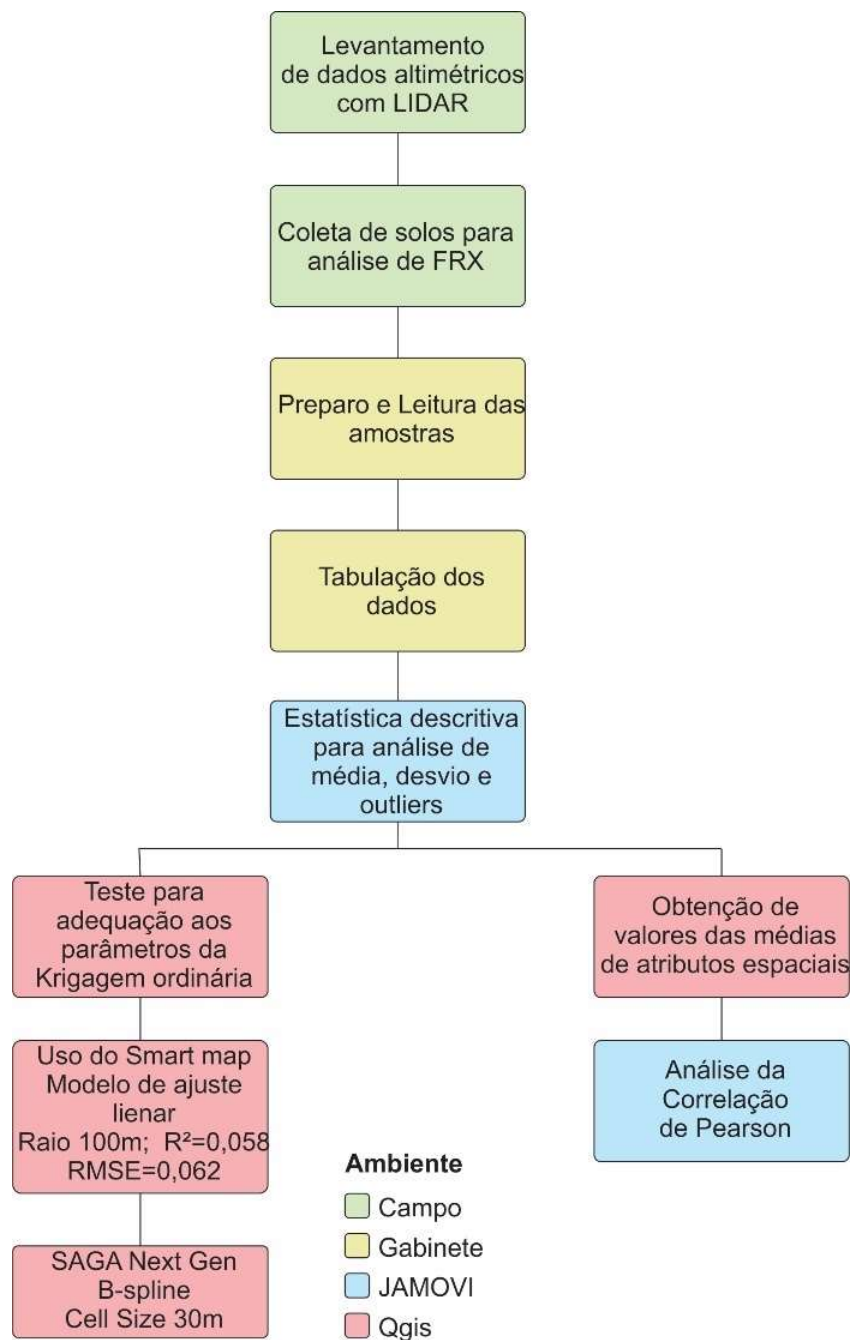


Figura 2 - Fluxograma metodológico

Fonte: Autor

4. RESULTADOS

4.1. Análise Morfológica da Área de Estudo

O sobrevoo permitiu a confecção de um MDT com resolução espacial de 80 centímetros e resolução vertical de 8 centímetros. Tal resultado permite a análise de feições de detalhe de processos erosivos, mesmo que estejam em estados iniciais de remodelamento da paisagem. A área de estudo apresentou uma amplitude de 26,44 metros de altitude, com 588,02 m em seu ponto mais alto e 561,58 m já próximo às margens do rio Sucuri (Figura 3).

A rugosidade do terreno evidencia a presença de diversos processos erosivos em diferentes níveis de evolução (Figura 3). Embora o proprietário tenha realizado o terraceamento de sua propriedade, os fluxos hídricos concentrados ainda conseguem esculpir sulcos e ravinas ao longo de toda área de estudo. Tais fluxos apresentam morfologia simétrica, fortemente condicionado às cercas para manejo da pecuária leiteira a qual a propriedade se vocaciona. Todavia, o objetivo deste trabalho se concentra no processo erosivo linear em que a morfologia se apresenta assimétrica, com sentido Norte-Sul, acompanhando a morfologia natural do terreno, localizado ao centro da propriedade.

A partir dos dados do Índice de Umidade Topográfica (TWI) é possível compreender que os terraços atuais não estão cumprindo o papel de contenção dos fluxos superficiais, possibilitando assim a convergência e aumento do poder de transporte do escoamento superficial (Figura 4).

O escoamento difuso na porção nordeste da área de estudo corrobora para que não exista feições erosivas nesta região, mesmo em áreas que também possuem cercas nos pastos. A morfologia atual do terreno propicia a convergência dos fluxos de toda a porção leste para um único canal central de escoamento. Deste modo, em chuvas intensas o volume de água nesta ravina adquire competência para transportar partículas e agregados, aprofundando a feição principal em até 2m em relação ao seu entorno (Figura5).

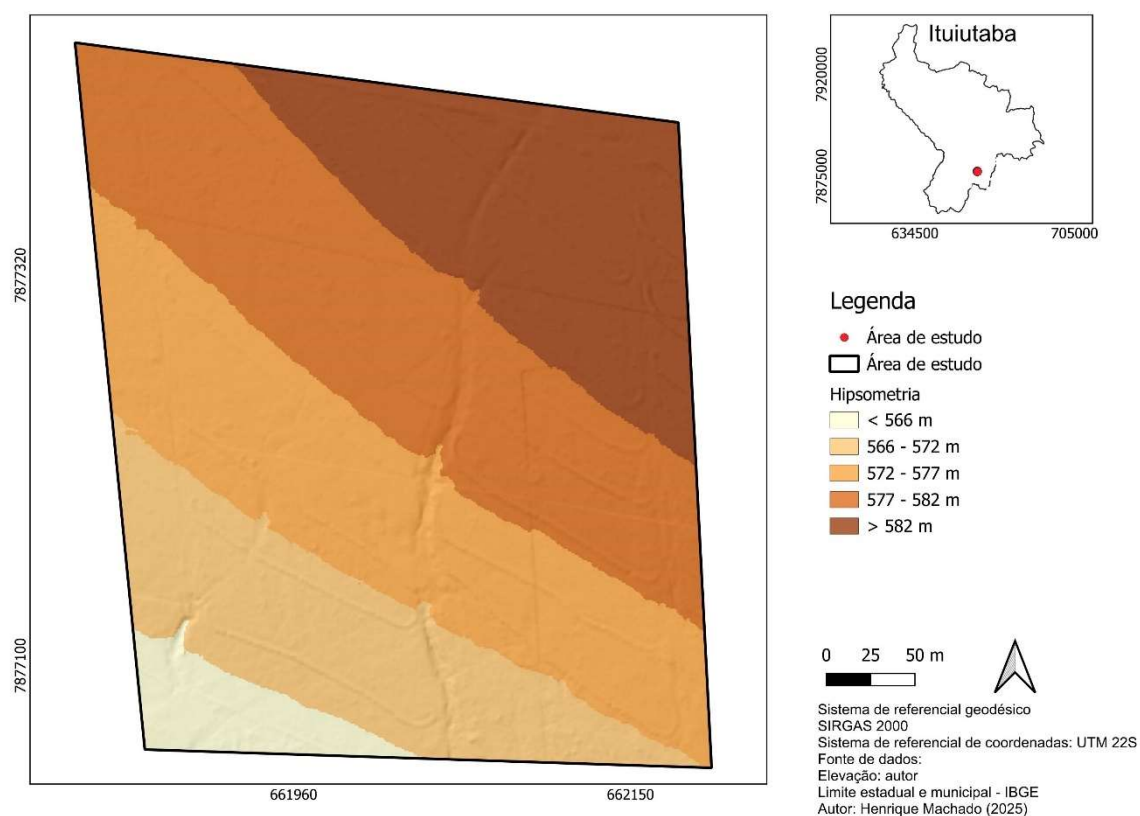


Figura 3 - Hipsometria e rugosidade da área de estudo
Fonte: Autor

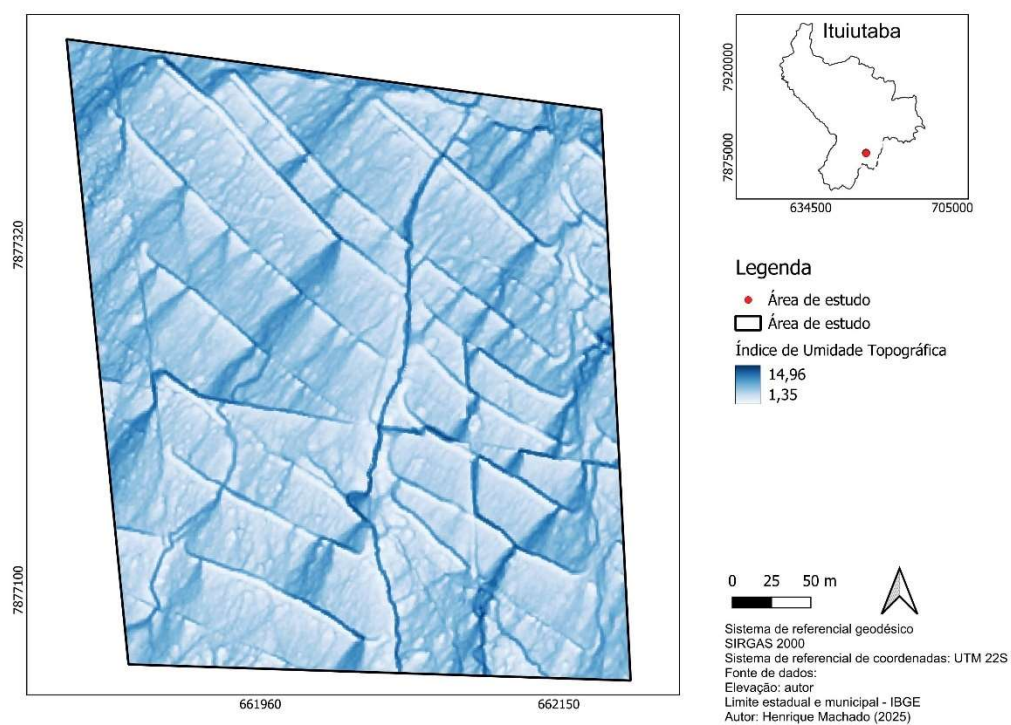


Figura 4 - Índice de Umidade Topográfica da área de estudo
Fonte: Autor

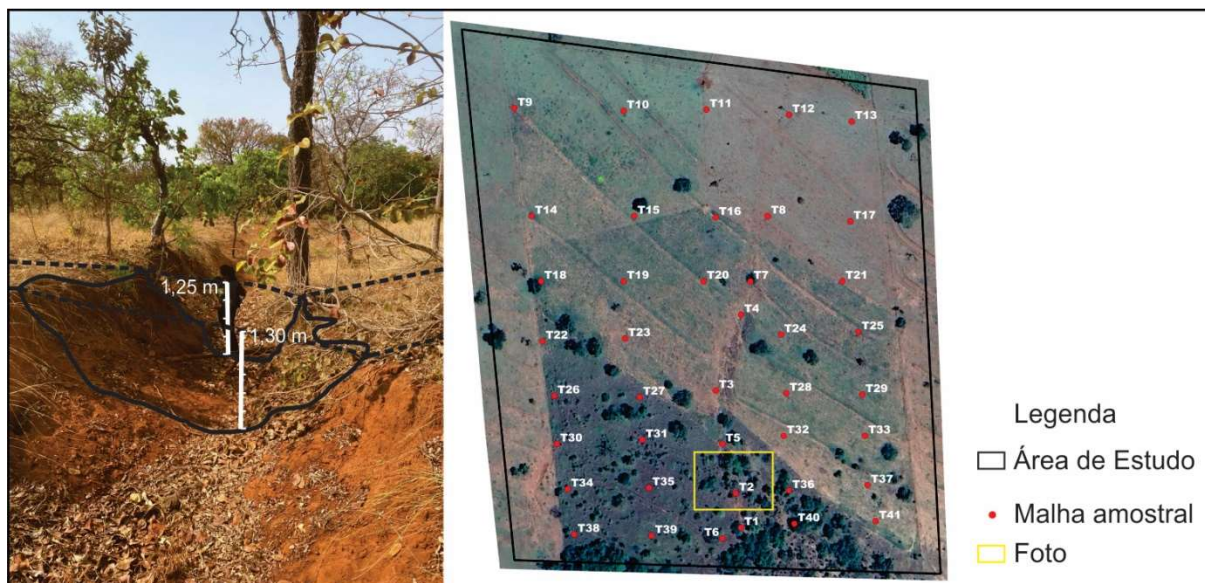


Figura 5 - Processo Erosivo em detalhe
 Fonte: Autor

Embora a declividade fique majoritariamente abaixo dos 8% é perceptível que esse remodelamento pelo processo linear tem produzido uma feição contrastante (Figura 6). Suas paredes podem chegar a mais de 45% de declive na porção mais ao sul. Em parte a produção de um relevo escarpado pode ser atribuído à baixa agregação do solo estudado, constituído basicamente por areia levemente cimentada por óxidos de ferro.

4.2. Resultados Geoquímicos

O ferro apresentou um comportamento relativamente homogêneo na área de estudo, com uma baixa dispersão com teores variando entre 21 a 55 g.kg⁻¹ (Figura 7). Tal resultado conduz ao entendimento que toda área pode ser classificada como hipoférrica (Santos, et al., 2018).

Ao se analisar as correlações existentes entre o elemento ferro com as demais variáveis do terreno é possível notar que a distribuição deste elemento químico não está relacionada significativamente com nenhuma variável do terreno, inclusive ao movimento superficial da água (Tabela 1). Mesmo que fraca a interação entre o ferro e altitude pode levantar uma hipótese de um processo de remoção do ferro do topo em detrimento de um acúmulo no fundo de vale.

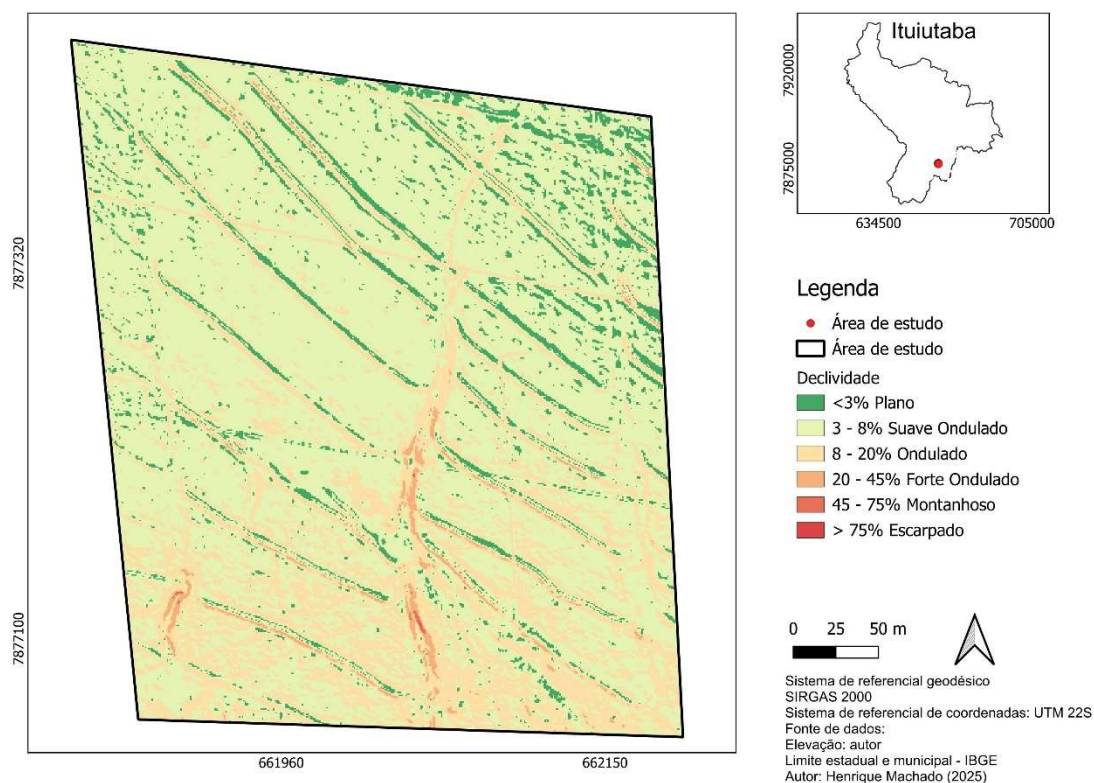


Figura 6 - Mapa de Declividade
Fonte: Autor

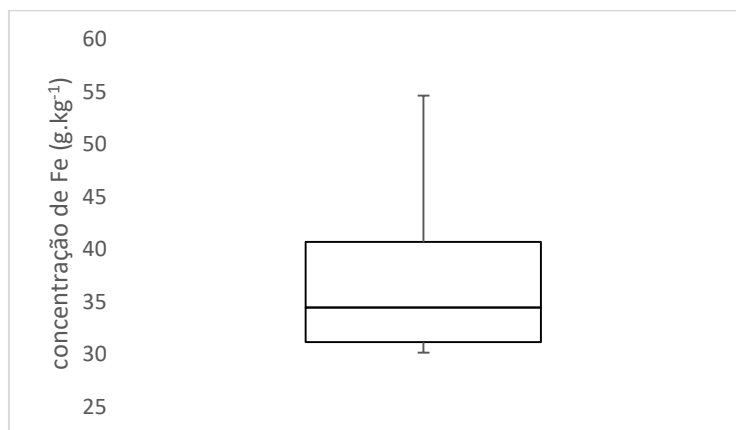


Figura 7 - Boxplot da concentração de Fe₂O₃ no solo

Tabela 1 - Correlação de Pearson para as variáveis selecionadas (TWI)

	F ₂ O ₃	Declividade	Rugosidade	Altitude	TWI
F ₂ O ₃	1,00	0,14	0,13	-0,23	-0,18
Declividade	0,14	1,00	1,00	-0,54	-0,23
Rugosidade	0,13	1,00	1,00	-0,53	-0,23
Altitude	-0,23	-0,54	-0,53	1,00	0,11
TWI	-0,18	-0,23	-0,23	0,11	1,00

*p< 0,5 – nenhuma análise foi significativa

A partir dos dados levantados em campo buscou-se um modelo de interpolação dos dados para ser possível avaliar a distribuição espacial do ferro e sua relação com um processo erosivo linear. A partir da análise do semivariograma foi descartado o uso da krigagem ordinária como método de espacialização dos dados. Deste modo, o método que melhor se ajustou aos dados foi o de interpolação por vizinho mais próximo (IDW), utilizando-se para isso uma distância de eixo de até 30 metro.

A espacialização do ferro demonstrou uma associação entre a ocorrência do processo erosivo e a depreciação nos valores deste elemento químico no solo. Conforme indicado pela análise de correlação, as regiões mais baixas da paisagem tendem a acumular mais ferro que as posições de média e alta vertente (Figura 8).

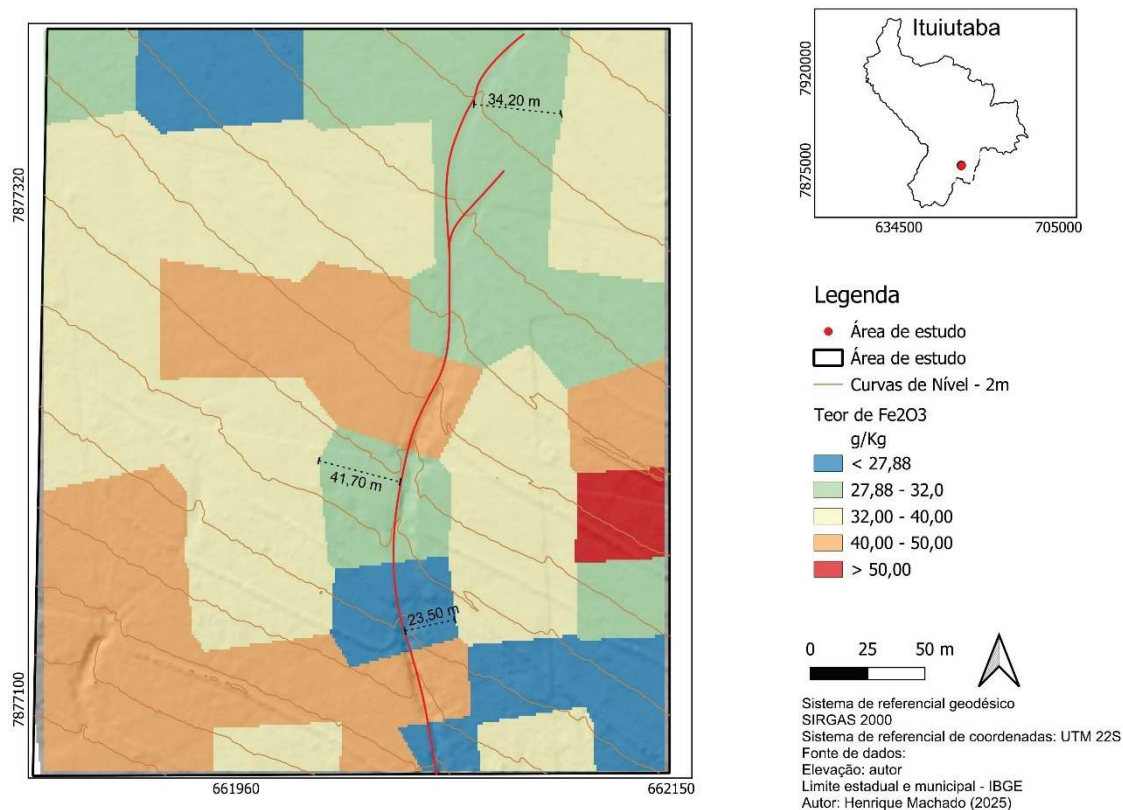


Figura 8 - Comportamento espacial do ferro total (Fe₂O₃ em g/kg)
Fonte: Autor

Um comportamento padrão analisado foi a redução nos teores de ferro conforme a proximidade da feição erosiva. Em uma distância horizontal inferior a 50m mais de 80% dos pontos vizinhos ao eixo central da erosão apresentaram perca de ferro, demonstrando um comportamento espacial dependente do ferro em relação ao novo eixo de drenagem estabelecido pela erosão.

5. DISCUSSÃO

5.1. Relação do Ferro com as Feições Erosivas na Paisagem

O mapeamento em escala de detalhe permitiu a identificação de feições de sulcos ainda em estágios iniciais ao mesmo tempo que caracterizou processos já antigos e consolidados na área de estudo. A morfologia dos sulcos tende a acompanhar as cercas, independente de sua direção em relação a declividade do terreno. As ravinas por sua vez não seguem uma morfologia linear, podendo estar relacionada tanto à morfologia natural do terreno quanto a possíveis trilheiros deixados pelo manejo do gado.

O uso do Índice de Umidade Topográfica (TWI) foi determinante para revelar a ineficácia dos terraços em controlar o escoamento. Fato que leva ao entendimento da instalação do processo erosivo por ação antrópica, mesmo o solo apresentando atributos que já o tornam altamente susceptível. A adoção desta técnica de conservação de solos é fundamental neste cenário de solos arenosos com baixo teor de agentes cimentes como óxidos de ferro ou matéria orgânica (CHEN; WEI; CHEN, 2017).

A presença de declividades superiores a 45% nas bordas da ravina sugere um aumento exponencial na energia cinética dos fluxos de água, resultando em maior capacidade erosiva, enquadrando a principal ravina estudada conforme teorias clássicas sobre erosividade hídrica (COGO; LEVIEN; SCHWARZ, 2003; BENES, et al., 2006; SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

A correlação, ainda que fraca, porém significativa, entre teor de ferro e altitude sugere um processo de desferruginização nos topos, com possível acúmulo nas porções mais baixas do terreno. Em contrapartida a dissipação geomorfológica revelada pelo semivariograma, com baixa continuidade espacial, pode induzir a uma interpretação de perdas localizadas e heterogêneas de ferro, resultante de fluxos direcionados em detrimento de um processo de formação de solos regionalizado.

A análise das condições geomorfológicas e geoquímicas apresentadas desfaz essa dicotomia, sustentando a hipótese de que a concentração do escoamento superficial orienta a perda de ferro a partir do estabelecimento de um novo padrão de drenagem. A possibilidade de erosivos lineares removerem partículas finas do solo, incluindo nestas os óxidos de ferro, já é bem difundida na literatura (GUZMÁN; BARRÓN; GÓMEZ, 2010; NAGY et al., 2012; RIENZI, et al., 2015; ASTORGA et al., 2018).

As rupturas dos terraços foram um fator condicionante para o início do processo de elutriação do ferro. A baixa cobertura da pastagem degradada aliada à concentração de um fluxo hídrico em um solo com granulometria majoritariamente arenosa e com grau de desenvolvimento fraco, além das condições de manejo do solo, foram fundamentais para a desagregação do horizonte superficial. A partir da dispersão das argilas o transporte indiscriminado no eixo central e posteriormente seletivo ao longo do eixo erosivo principal fez com que os teores de ferro fossem reduzidos em comparação ao entorno.

A elutriação é sobretudo mais forte quando se aproxima de zonas com maior velocidade de escoamento superficial e subsuperficial. Neste estudo a distância máxima de influência da



erosão na dinâmica do ferro foi inferior a 45m. Quando comparado a fases iniciais como os sulcos, este elemento não se comportou como um bom indicador.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de estudo apresentou uma sequência de processos erosivos lineares, abrangendo desde sulcos centimétricos até ravinas. A gênese destes processos está ligada a intervenção antrópica a partir da instalação de cercas para manejo da pecuária assim como da não manutenção de terraços em curva de nível. O uso do sensor LIDAR permitiu uma análise morfológica em escala de detalhe, confirmando falhas no controle hídrico, evidenciando que o terraceamento sem manutenção periódica pode ser precursor para a perda de solo.

A concentração de escoamento em feições lineares é responsável pela mobilização de ferro. Sua circulação pode estar mais relacionada com o transporte físico de partículas de argilas oxídicas – elutriação em detrimento de um processo geoquímico de dissolução e transporte subsuperficial. Trabalhos futuros que correlacionem a saída de ferro e suas possíveis formas de cristalinidade com mudanças granulométricas podem elucidar o processo de elutriação. A saída do ferro do sistema não é homogênea, havendo indícios de desferruginação no topo e redistribuição para áreas mais baixas, atribuída a fluxos superficiais.

O uso da Fluorescência de Raios X portátil se mostrou bastante útil para o entendimento da dinâmica superficial do ferro, permitindo que variações em uma área relativamente pequena fossem detectadas. Para futuros trabalhos recomenda-se uma maior densidade amostral de forma que seja possível aplicar outros métodos de predição espacial, como a krigagem, por exemplo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANACHE, J. A.A et al. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. *Science of the Total Environment*, v. 622, p. 140-151, 2018.

ASTORGA, R.T.; VILLALOBOS, S.S.; VELASCO, H.; DOMÍNGUEZ-QUINTERO, O.; CARDOSO, R.P.; ANJOS, R.M.; DIAWARA, Y.; DERCON, G.; MABIT, L. Exploring innovative techniques for identifying geochemical elements as fingerprints of sediment sources in an agricultural catchment of Argentina affected by soil erosion. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 20868-20879, 2018.

BACELLAR, L.A.P.; NETTO, AL COELHO; LACERDA, W. A. Controlling factors of gully erosion in the Maracujá Catchment, Southeastern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group**, v. 30, n. 11, p. 1369-1385, 2005.

BARTHÈS, B.; ROOSE, E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. **Catena**, v. 47, n. 2, p. 133-149, 2002.

BENEŠ, B.; TĚŠÍNSKÝ, V.; HORNYŠ, J.; BHATIA, S. K. Hydraulic erosion. **Computer Animation and Virtual Worlds**, v. 17, n. 2, p. 99-108, 2006.

BEN-HUR, M.; WAKINDIKI, I. I. C. Soil mineralogy and slope effects on infiltration, interrill erosion, and slope factor. **Water Resources Research**, v. 40, n. 3, 2004.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009.

BOARDMAN, J.; POESEN, J.; EVANS, R. Socio-economic factors in soil erosion and conservation. **Environmental Science & Policy**, v. 6, n. 1, p. 1-6, 2003.

BORELLI, P.; ALEWELL, C.; ALVAREZ, P.; ANACHE, J.A.A.; BAARTMAN, J.; BALLABIO, C.; BEZAK, N.; BIDDOCU, M.; CERDÀ, A.; CHALISE, D.; CHEN, S.; CHEN, W.; DE GIROLAMO, A.M.; GESSESSE, G.D.; DEUMLICH, D.; DIODATO, N.; EFTHIMIOU, N.; ERPUL, G.; FIENER, P.; FREPPAZ, M.; PANAGOS, P. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. **Science of the total environment**, v. 780, p. 146494, 2021.

BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; LUGATO, E.; YANG, J. E.; ALEWELL, C.; ...BALLABIO, C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 36, p. 21994-22001, 2020.

CHEN, D.; WEI, W.; CHEN, L.. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis. **Earth-Science Reviews**, v. 173, p. 109-121, 2017.

COGO, N.P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R.A.. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 743-753, 2003.

EEKHOUT, J. P.C; DE VENTE, J. Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. **Earth-Science Reviews**, v. 226, p. 103921, 2022.

ENE, A.; BOSNEAGA, A.; GEORGESCU, L. Determination of heavy metals in soils using XRF technique. **Rom. Journ. Phys**, v. 55, n. 7-8, p. 815-820, 2010.

FIGUEIREDO, M. do A.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; FABRIS, J. D. Mineralogy, size, morphology and porosity of aggregates and their relationship with soil susceptibility to water erosion. **Hyperfine Interactions**, v. 122, p. 177-184, 1999.

GALDINO, S.; SANO, E. E.; ANDRADE, R. G.; GREGO, C. R.; NOGUEIRA, S. F.; BRAGANTINI, C.; FLOSI, A. H. Large-scale modeling of soil erosion with RUSLE for conservationist planning of degraded cultivated Brazilian pastures. **Land degradation & development**, v. 27, n. 3, p. 773-784, 2016.

GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; NADAL-ROMERO, E.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C.; LANA-RENAULT, N.; SANJUÁN, Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. **Geomorphology**, v. 239, p. 160-173, 2015.

GUZMÁN, G.; BARRÓN, V.; GÓMEZ, J.A. Evaluation of magnetic iron oxides as sediment tracers in water erosion experiments. **Catena**, v. 82, n. 2, p. 126-133, 2010.

HOLZ, D. J.; WILLIARD, K. W.; EDWARDS, P. J.; SCHOONOVER, J. E. Soil erosion in humid regions: A review. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, v. 154, n. 1, p. 48-59, 2015.

HUANG, Jingyi; HARTEMINK, Alfred E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, v. 208, p. 103295, 2020.

HURNI, H.; HERWEG, K.; PORTNER, B.; LINIGER, H. Soil erosion and conservation in global agriculture. **Land use and soil resources**, p. 41-71, 2008.

IMANISHI, Y.; BANDO, A.; KOMATANI, S.; WADA, S.; TSUJI, K. Experimental parameters for XRF analysis of soils. **Powder Diffr**, v. 53, p. 248-255, 2010.

ISSAKA, S.; MUHAMMAD, A.A.. Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. **Geology, Ecology, and Landscapes**, v.1, n.1, 2017

JAMOVI. The jamovi project (2024). jamovi. (Version 2.6) [Computer Software]. Disponível em: <<https://www.jamovi.org>> Acesso em 21/06/2025

KASANIN-GRUBIN, M. Clay mineralogy as a crucial factor in badland hillslope processes. **Catena**, v. 106, p. 54-67, 2013.



KLOCKENKÄMPER, R. Challenges of total reflection X-ray fluorescence for surface-and thin-layer analysis. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 61, n. 10-11, p. 1082-1090, 2006.

KUCHER, A.; KUCHER, L.; SYSOIEVA, I.; POHRISHCHUK, B. Economics of soil erosion: case study of Ukraine. **Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal**, v. 7, n. 4, p. 27-41, 2021.

LABRIÈRE, N.; LOCATELLI, B.; LAUMONIER, Y.; FREYCON, V.;BERNOUX, M. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 203, p. 127-139, 2015.

LAL, R. Soil erosion and carbon dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 81, n. 2, p. 137-142, 2005.

LI, X.; WEI, X. Analysis of the relationship between soil erosion risk and surplus floodwater during flood season. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 7, p. 1294-1311, 2014.

LI, Z.; FANG, H. Impacts of climate change on water erosion: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 163, p. 94-117, 2016.

LIMA, T. M.; WEINDORF, D. C.; CURI, N.; GUILHERME, L. R.; LANA, R. M.; RIBEIRO, B. T. Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. **Geoderma**, v. 353, p. 264-272, 2019.

LOWERY, B.; SWAN, J.; SCHUMACHER, T.; JONES, A. Physical properties of selected soils by erosion class. **Journal of soil and water conservation**, v. 50, n. 3, p. 306-311, 1995.

MAGALHÃES, I. A. L.; SANTOS, A. R. Uso De Geotecnologias Para Estimativa De Perda Solo E Identificação Das Áreas Susceptíveis A Erosão Laminar Na Bacia Hidrográfica Do Rio Vieira Município De Montes Claros, Mg. **Cadernos de Geociências**, v. 9, n. 2, p. 74-84, 2012.

MAHABALESHWARA, H.; NAGABHUSHAN, H. M. A study on soil erosion and its impacts on floods and sedimentation. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 3, n. 3, p. 443-451, 2014.

MARTINS, F. P.; COSTA, R. A. A Compartimentação do relevo como subsídio aos estudos ambientais no município de Ituiutaba-MG. **Revista Sociedade e Natureza**. v. 26. n. 2. Uberlândia, p. 317-331., 2014.

MENDES, H.; TAVARES, A. S.; REIS DOS SANTOS, W.; SILVA, M. L. N.; SANTOS, B. R.; MINCATO, R. L. Water erosion in oxisols under coffee cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. e0170093, 2018.

MERTEN, G.H.; MINELLA, J.P.G. The expansion of Brazilian agriculture: soil erosion scenarios. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 1, n. 3, p. 37-48, 2013.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil science society of America Journal**, v. 48, n. 5, p. 1152-1157, 1984.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov. 2007.

MORGAN, R.P.C.. **Soil erosion and conservation**. John Wiley & Sons, 2009.

NAGY, R.; ZSOFI, Z.; PAPP, I.; FÖLDVÁRI, M.; KERENYI, A.; SZABO, S. Evaluation of the relationship between soil erosion and the mineral composition of the soil: A case study from a cool climate wine region of Hungary. **Carpathian journal of earth and environmental sciences**, v. 7, n. 1, p. 223-230, 2012.

NCIIZAH, A.D.; WAKINDIKI, I.I.C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 61, n. 6, p. 827-842, 2015.

NEARING, M.A. Soil erosion and conservation. **Environmental modelling: Finding simplicity in complexity**, p. 365-378, 2013.

NOVARA, A.; PISCIOTTA, A.; MINACAPILLI, M.; MALTESE, A.; CAPODICI, F.; CERDÀ, A.; GRISTINA, L. The impact of soil erosion on soil fertility and vine vigor. A multidisciplinary approach based on field, laboratory and remote sensing approaches. **Science of the Total Environment**, v. 622, p. 474-480, 2018.

OLIVEIRA, W.F.; LEITE, M.E. Perda de Solo por Erosão Hídrica em Bacia Hidrográfica: o caso da área de drenagem da barragem do Rio Juramento, no Norte do estado de Minas Gerais. **Caminhos de Geografia**, v. 19, n. 67, p. 16-37, 2018.

OYEDOTUN, T.D.T. X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview. **Geology, Ecology, and Landscapes**, v. 2, n. 2, p. 148-154, 2018.

ØYGARDEN, L.; KVÆRNER, J.; JENSSEN, P. D. Soil erosion via preferential flow to drainage systems in clay soils. **Geoderma**, v. 76, n. 1-2, p. 65-86, 1997.

OWOPUTI, L. O.; STOLTE, W. J. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n.4, 1995.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; ROBINSON, D. FAO calls for actions to reduce global soil erosion. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 25, p. 789-790, 2020.

PELEGRINO, M. H. P.; SILVA, S. H. G.; FARIA, Á. J. G.; MANCINI, M.; TEIXEIRA, A. F. D. S.; CHAKRABORTY, S.; ...; CURI, N. Prediction of soil nutrient content via pXRF spectrometry and its spatial variation in a highly variable tropical area. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 1, p. 18-34, 2022.

PIMENTEL, D.; BURGESS, M. Soil erosion threatens food production. **Agriculture**, v. 3, n. 3, p. 443-463, 2013.

RADU, T.; DIAMOND, D. Comparison of soil pollution concentrations determined using AAS and portable XRF techniques. **Journal of hazardous materials**, v. 171, n. 1-3, p. 1168-1171, 2009.

RHODES, C.J. Soil erosion, climate change and global food security: challenges and strategies. **Science progress**, v. 97, n. 2, p. 97-153, 2014.

RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; GUILHERME, L. R. G. Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, p. 245-254, 2017.

RIENZI, E. A.; MATOCHA, C. J.; GROVE, J. H.; WENDROTH, O.; FOX, J. F. Enrichment ratio of poorly crystallized iron mobilized with clay/silt-sized particles released via interrill erosion. **Catena**, v. 124, p. 130-137, 2015.

ROCHA, L.B.O.; MAGRI, R.A.F. PREDIÇÃO DA PERDA DE SOLO POR EROSÃO LAMINAR NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO BOCAINA, PASSOS-MG. **Caminhos de Geografia**, v.23, n.87, 2022

SAMPAIO, L. D. F.; OLIVEIRA, M. P. P. D.; CASSARO, R.; RODRIGUES, V. G. S.; PEJON, O. J.; SÍGOLO, J. B.; FERREIRA, V. M. Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: A case study of Nazareno (Minas Gerais, Brazil). **Dyna**, v. 83, n. 199, p. 198-206, 2016.

SANTOS, G.G.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 115-123, 2010.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed. Embrapa, Brasília, 2018

SHIKANGALAH, R. N.; JELTSCH, F.; BLAUM, N.; MUELLER, E. N A review on urban soil water erosion. **Journal for Studies in Humanities and Social Sciences**, p. 163-178, 2016.

SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; POGGERE, G. C.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Tropical soils characterization at low cost and time using portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF): Effects of different sample preparation methods. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 1, p. 80-92, 2018.

SPAROVEK, G.; CORRECHEL, V.; BARRETTO, A.G.O. The risk of erosion in Brazilian cultivated pastures. **Scientia Agricola**, v. 64, p. 77-82, 2007.

TAVARES, T. R.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.; CHERUBIN, M. R.; MARQUES, G. T.; RAGAGNIN, M. M.; ...; DE CARVALHO, H. W. P. Estimating plant-available nutrients with XRF sensors: Towards a versatile analysis tool for soil condition assessment. **Geoderma**, v. 439, p. 116701, 2023a.

TAVARES, T. R.; ALMEIDA, E.; JUNIOR, C. R. P.; GUERRERO, A.; FIORIO, P. R.; CARVALHO, H. W. P. Analysis of total soil nutrient content with X-ray Fluorescence

spectroscopy (XRF): Assessing different predictive modeling strategies and auxiliary variables. **AgriEngineering**, v. 5, n. 2, p. 680-697, 2023b.

THOMAZ, E. L.; LUIZ, J. C. Soil loss, soil degradation and rehabilitation in a degraded land area in Guarapuava (Brazil). **Land Degradation & Development**, v. 23, n. 1, p. 72-81, 2012.

TOY, T.J.; FOSTER, G.R.; RENARD, K.G. **Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control**. John Wiley & Sons, 2002.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, n. 2-3, p. 132-153, 2005.

TOWETT, E.K.; SHEPHERD, K.D.; CADISCH, G. Quantification of total element concentrations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF). **Science of the Total Environment**, v. 463, p. 374-388, 2013.

WANG, L.; SHI, Z. H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 3, p. 917-929, 2015.

WEI, Yujie; WU, Xinliang; CAI, Chongfa. Splash erosion of clay-sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure. **Catena**, v. 135, p. 254-262, 2015.

WILLIAMS, R.; TAYLOR, G.; ORR, C. pXRF method development for elemental analysis of archaeological soil. **Archaeometry**, v. 62, n. 6, p. 1145-1163, 2020.

WU, C. M.; TSAI, H. T.; YANG, K. H.; WEN, J. C. How reliable is X-ray fluorescence (XRF) measurement for different metals in soil contamination?. **Environmental Forensics**, v. 13, n. 2, p. 110-121, 2012.

YANG, Q.; PENG, J.; NI, S.; ZHANG, C.; WANG, J.; CAI, C. Soil erosion-induced decline in aggregate stability and soil organic carbon reduces aggregate-associated microbial diversity and multifunctionality of agricultural slope in the Mollisol region. **Land Degradation & Development**, v. 35, n. 11, p. 3714-3726, 2024.

ZACHAR, D. **Soil erosion**. Elsevier, 2011.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
COORDENADORIA DE EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA



ATA Nº 3585/2025 - CEAD (12.28.01.36)

Nº do Protocolo: 23083.040196/2025-64

Seropédica-RJ, 23 de julho de 2025.

ATA DE DEFESA

Aos quinze dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e cinco, às treze horas, através de web conferência, instalou-se a banca examinadora de Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos, do cursista **Henrique Amorim Machado** sob a orientação da professora **Helena Saraiva Koenow Pinheiro**. A banca examinadora foi composta pelos pesquisadores **Niriele Bruno Rodrigues** e **Otávio Augusto Queiroz dos Santos**. A defesa do TCC intitulado "**Avaliação da área de influência de um processo erosivo linear na dinâmica do ferro do solo**", foi iniciada às treze horas e teve a duração de vinte minutos de apresentação seguida da avaliação pela banca. O cursista, após avaliado pela banca examinadora obteve o resultado:

(X) APROVADO, devendo o cursista proceder a eventual revisão solicitada pela supervisora e /ou pela banca, e entregar a versão final em até 15 dias à coordenação do Curso.

() NÃO APROVADO.

Seropédica, 15 de julho de 2025.

Niriele Bruno Rodrigues

Primeira Examinadora

Otávio Augusto Queiroz dos Santos

Segundo Examinador

Helena Saraiva Koenow Pinheiro

Presidente

Henrique Amorim Machado

Cursista

(Assinado digitalmente em 23/07/2025 11:47)
HELENA SARAIVA KOENOW PINHEIRO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
Dept5 (12.28.01.00.00.33)
Matricula: ###236#8

(Assinado digitalmente em 26/07/2025 11:24)
HENRIQUE AMORIM MACHADO
DISCENTE
Matricula: 2024#####5



(Assinado digitalmente em 23/07/2025 11:33)
OTAVIO AUGUSTO QUEIROZ DOS SANTOS
DISCENTE
Matrícula: 2021#####

(Assinado digitalmente em 23/07/2025 12:52)
NIRIELE BRUNO RODRIGUES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.797-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrr.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 3585, ano: 2025, tipo: ATA, data de emissão: 23/07/2025 e o código de verificação: 8272b1a06a

C