



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**DANIEL AUGUSTO MIRANDA GONÇALVES**

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS QUARTZITOS DOS CAMPOS RUPESTRES  
DA REGIÃO DE RIO ACIMA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS**

**MONOGRAFIA nº 571**

**OURO PRETO  
Janeiro 2026**

Daniel Augusto Miranda Gonçalves

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS QUARTZITOS DOS CAMPOS RUPESTRES  
DA REGIÃO DE RIO ACIMA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao curso de Engenharia Geológica da  
Universidade Federal de Ouro Preto como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Engenheiro Geólogo.

Orientadora: Dra. Maria Augusta G. Fujaco

Coorientadoras: Dra. Mariangela G. Leite

Dra. Rosa Correa Pabón

**OURO PRETO  
2026**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G635c Gonçalves, Daniel Augusto Miranda.

Caracterização espectral dos quartzitos dos campos rupestres da região de Rio Acima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. [manuscrito] / Daniel Augusto Miranda Gonçalves. - 2026.

76 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadores: Profa. Dra. Maria Augusta Gonçalves Fujaco, Dra. Rosa Elvira Correa Pabon.

Coorientadora: Profa. Dra. Mariangela Garcia Praça Leite.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Sensoriamento remoto. 2. Campos rupestres. 3. Espectroscopia de reflectância. 4. Quadrilátero Ferrífero (MG). 5. Rochas - Biblioteca espectral. 6. Solos - Biblioteca espectral. I. Fujaco, Maria Augusta Gonçalves. II. Pabon, Rosa Elvira Correa. III. Leite, Mariangela Garcia Praça. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 528.8

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Daniel Augusto Miranda Gonçalves**

### **Caracterização Espectral dos Quartzitos dos Campos Rupestres da Região do Rio Acima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 23 de janeiro de 2026

#### Membros da banca

[Dra] - Maria Augusta Gonçalves Fujaco - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
[Dra] - Maria Eugênia Silva de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto  
[Engenheiro Geólogo] - Marcos Maia Freire de Oliveira- VALE

Maria Augusta Gonçalves Fujaco, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/01/2026



Documento assinado eletronicamente por **Maria Augusta Goncalves Fujaco, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/01/2026, às 14:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1050506** e o código CRC **BB79A0AB**.

Ao caro leitor que decidir vasculhar estas páginas até o fim, dedico este singelo volume.

## AGRADECIMENTOS

A gratidão talvez seja um dos sentimentos mais elevados do ser humano, pois brota da consciência de que nenhuma conquista é solitária, toda realização carrega em si a marca de muitas mãos.

Meus agradecimentos mais profundos e sinceros vão para os meus pais, João Gonçalves e Eliete Gonçalves. Cada dia deste percurso, até o fechamento deste ciclo, contou com o apoio incondicional de vocês, por acreditarem em mim quando eu duvidava, por incentivarem sem pedir nada em troca além da minha felicidade. Nenhuma palavra alcança o tamanho da minha gratidão. Ainda assim, deixo registrada: ser filho de vocês é um privilégio imenso.

À minha melhor amiga, Maria Clara, por caminhar comigo em cada passo desta jornada, nas alegrias e nas dificuldades. Sua amizade me acolheu, me fortaleceu e me inspirou a crescer. Espelhar-me em você me tornou alguém melhor. Sem você, tudo teria sido infinitamente mais difícil e menos significativo.

À minha querida amiga e orientadora, Maria Augusta Gonçalves Fujaco, por ter caminhado comigo com tanto carinho, dedicação e paciência, não só durante a construção deste trabalho, mas ao longo de toda a minha jornada no Departamento de Geologia da UFOP.

À minha amiga Mariana Sampaio de Oliveira, pela companhia e pela ajuda na execução deste trabalho.

Aos meus amigos João Andreazzi, Bárbara Rezende, Antônio Moura, Cesar Lucas, Carolina Marttens, Daniel Camacho, Luana Piermatei, Elenir Carmo, Marcos Oliveira e principalmente Letícia Martins por acreditarem em mim e me incentivarem a ser melhor todos os dias.

Aos meus amigos Lucca Lotti, Juan Carlos Igor Matias, Vitória Rodrigues, Mauro Célio, Sofia Etrusco, Ana Luísa Osório, Yan Lemes, Thales Stilhano, Lucas Nascimento e Álvaro Targon, por todo o companheirismo ao longo do curso. Vocês tornaram meus dias na UFOP muito mais leves e felizes.

À Vale, especialmente ao ITV, pelo apoio à execução deste trabalho, agradeço também pela oportunidade do estágio, que me proporcionou uma formação prática sólida e o contato direto com diferentes áreas de atuação profissional, contribuindo de forma decisiva para meu amadurecimento técnico, acadêmico e pessoal.

À Universidade Federal de Ouro Preto e ao Departamento de Geologia, por terem sido o espaço onde cresci não apenas como estudante, mas como pessoa. A formação pública e de qualidade oferecida ao longo da graduação foi fundamental para a construção do meu pensamento crítico, da minha identidade profissional e do caminho que sigo a partir daqui.

## RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero, localizado na porção central de Minas Gerais, constitui uma das principais províncias metalogenéticas do Brasil e abriga ecossistemas de elevada relevância ecológica, como os campos rupestres desenvolvidos sobre substratos quartzíticos. Este trabalho realizou a caracterização espectral de rochas e solos associados a campos rupestres quartzíticos da região de Rio Acima, com o objetivo de construir uma biblioteca espectral de referência e avaliar os controles litológicos, intempéricos e pedogenéticos sobre a resposta espectral desses materiais. As curvas de reflectância foram adquiridas nas regiões do visível ao infravermelho de ondas curtas (VNIR–SWIR), utilizando espetrorradiômetro FieldSpec 4 Hi-Res, e processadas no software Hemera. A interpretação espectral foi integrada à caracterização macroscópica das amostras, à comparação com espectros da biblioteca do Serviço Geológico do Brasil e aos dados geoquímicos obtidos por fluorescência de raios X. Os resultados indicam que a resposta espectral é controlada principalmente pela mineralogia acessória e pelo grau de intemperismo, enquanto a matriz quartzosa exerce influência secundária. Nas rochas, a presença de filossilicatos aluminosos é marcada pela banda aluminosa em torno de 2200 nm, em concordância com teores elevados de  $Al_2O_3$  e  $K_2O$ , enquanto as feições no VNIR refletem a participação variável de óxidos e hidróxidos de ferro, predominantemente goethita. Nos solos, observa-se intensificação das bandas de hidratação e simplificação da resposta espectral, típica de materiais fortemente intemperizados, com domínio de fases aluminosas. O estudo confirma o potencial da espectroscopia de reflectância como ferramenta complementar para a caracterização mineralógica de ambientes quartzíticos de campo rupestre e a biblioteca espectral gerada constitui um registro de referência para aplicações futuras em mapeamento geológico, prospecção mineral e monitoramento ambiental.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto; Campos Rupestres; Espectroscopia de reflectância; Quadrilátero Ferrífero; Biblioteca Espectral.

## ABSTRACT

The Quadrilátero Ferrífero, located in central Minas Gerais, is one of Brazil's main metallogenetic provinces and hosts ecologically significant ecosystems such as quartzite-hosted campos rupestres. This study presents the spectral characterization of rocks and soils associated with quartzite campos rupestres in the Rio Acima region, aiming to construct a reference spectral library and to evaluate lithological, weathering, and pedogenetic controls on spectral response. Reflectance spectra were acquired in the visible to shortwave infrared (VNIR–SWIR) regions using a FieldSpec 4 Hi-Res spectroradiometer and processed with the Hemera software. Spectral interpretation was integrated with macroscopic sample characterization, comparison with spectra from the Brazilian Geological Survey spectral library, and geochemical data obtained by X-ray fluorescence. The results indicate that spectral response is mainly controlled by accessory mineralogy and degree of weathering, whereas the quartz matrix plays a secondary role. In rocks, the presence of aluminous phyllosilicates is marked by the Al–OH absorption feature around 2200 nm, consistent with elevated  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{K}_2\text{O}$  contents, while VNIR features reflect variable contributions of iron oxides and hydroxides, predominantly goethite. Soils exhibit intensified hydration features and simplified spectral signatures typical of strongly weathered materials, with dominance of aluminous phases. The study confirms the potential of reflectance spectroscopy as a complementary tool for mineralogical characterization of quartzite campos rupestres environments, and the resulting spectral library provides a reference dataset for future applications in geological mapping, mineral exploration, and environmental monitoring.

**Keywords:** Remote sensing; reflectance spectroscopy; campos rupestres; Quadrilátero Ferrífero; spectral library.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização dos pontos de amostragem na área de estudo.....	17
Figura 2: Representação esquemática de uma onda eletromagnética se propagando no vácuo, composta por campos elétrico (E) e magnético (M) oscilando em planos mutuamente perpendiculares e perpendiculares à direção de propagação (c).....	20
Figura 3: Espectro eletromagnético completo com o visível em destaque.....	23
Figura 4: Representação esquemática do processo de FRX. O feixe de raios X primário ejeta um elétron de uma camada interna do átomo, gerando uma vacância. A transição de um elétron de maior energia para preencher essa vacância resulta na emissão de um fóton de raios X característico do elemento. ....	27
Figura 5: Cráton São Francisco com foco em sua porção meridional destacando o Quadrilátero Ferrífero e os cinturões orogênicos Brasília e Araçuaí. ....	31
Figura 6: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. ....	32
Figura 7: Amostras de solos para leitura espectral .....	36
Figura 8: Espectro de reflectância da amostra NLR-01A, com leituras interna e externa. Destacadas as regiões de absorção associadas ao $Fe^{3+}$ (430–480, 680 e 900 nm) e água (1930 nm).....	44
Figura 9: Espectro de reflectância da amostra NLR-01B, com leituras interna e externa, destacando feições férricas no VNIR (450–500, 680 e 900 nm), bandas de OH em 1413 nm e de água em 1932 nm, além de absorção aluminosa no SWIR em 2210 nm e feições secundárias em 2272 e 2475 nm.....	45
Figura 10: Espectro de reflectância da amostra NLR 04, com leituras interna e externa, destacando feições em 880, 1400 e 1915 nm, além da banda aluminosa em 2210 nm e absorções discretas entre 2340 e 2430 nm.....	46
Figura 11: Espectro de reflectância da amostra NLR-05, destacando feições em torno de 430, 480 e 900 nm, bandas em 1411 nm e 1912 nm, além da banda em aproximadamente 2200 nm e absorções discretas entre 2345 e 2437 nm.....	47
Figura 12: Espectro de reflectância da amostra NLR-06, com leituras interna e externa, destacando feições férricas no VNIR (425–480 e 900 nm), bandas de OH em 1400 nm e de água em 1900 nm, além de absorção aluminosa no SWIR em 2200 nm. ....	48
Figura 13: Espectro de reflectância da amostra NLR-07, com leituras interna e externa, destacando inflexão em torno de 530 nm, vale amplo próximo de 870 nm, feições de hidratação em aproximadamente 1400 e 1930 nm. ....	49
Figura 14: Espectro de reflectância da amostra NLR-08, com leituras interna e externa, destacando feições em 425, 475, 678 e 900 nm, absorção em aproximadamente 1411 nm, banda de água molecular próxima de 1924 nm, vale pronunciado no SWIR em torno de 2200 nm e absorções em 2345 nm, 2380 e 2437 nm.....	50

Figura 15: Comparação entre o espectro de reflectância da amostra NLR-04 e o espectro de referência 4320-SJ-R-0296 da biblioteca do Serviço Geológico do Brasil, incluindo leituras realizadas na face exposta (superfície intemperizada) e na face serrada (rocha sã)..... 52

Figura 16: Comparação entre o espectro de reflectância da amostra NLR-08 e o espectro de referência 4320-MF-R-0248, descrito como Quartzo-Mica-Xisto na biblioteca do Serviço Geológico do Brasil. São apresentadas duas leituras da amostra de referência, correspondentes à superfície de quebra natural (QN) e à face exposta. ..... 54

Figura 17: Espectro de reflectância do solo NLSO-02, destacando feições em torno de 422 e 479 nm, concavidade suave próxima de 900 nm, absorções em aproximadamente 1400 e 1900 nm, além de vales no SWIR centrados em torno de 2204 e 2268 nm. ..... 56

Figura 18: Espectro de reflectância do solo NLSO-03, destacando absorções em torno de 1400 e 1900 nm, além de um vale amplo e bem definido centrado em aproximadamente 2200 nm, com feições secundárias no SWIR entre cerca de 2347 e 2441 nm. ..... 57

Figura 19: Espectro de reflectância do solo NLSO-04, destacando feições em torno de 425 e 485 nm, concavidade suave próxima de 912 nm, absorções em aproximadamente 1412 e 1930 nm, além de um vale no SWIR centrado em torno de 2197 nm e feições secundárias entre cerca de 2346 e 2439 nm. ..... 58

Figura 20 Espectro de reflectância da amostra de solo NLSO-05, destacando feições em 425 e 475 nm e concavidade próxima de 900 nm, além das bandas de hidratação em 1410 e 1930 nm e da absorção aluminosa centrada em 2200 nm. ..... 59

## **LISTA DE QUADROS E TABELAS**

Quadro 1: Amostras de rocha para leitura espectral..... 34

Tabela 1: Metadados das amostras analisadas neste estudo, incluindo material, litologia, condição das superfícies analisadas, preparo e tempo de secagem, número de leituras espectrais e geoquímicas e coordenadas UTM..... 39

Tabela 2: Síntese da caracterização macroscópica das amostras. .... 41

Tabela 3: Composição química das amostras de rocha e solo expressa em óxidos maiores (%). .... 60

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	Apresentação .....	15
1.2	Localização .....	16
1.3	Objetivos.....	17
1.4	Justificativa .....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	20
2.1	Princípios do sensoriamento remoto.....	20
2.1.1	A radiação eletromagnética .....	20
2.1.2	O Espectro Eletromagnético .....	22
2.1.3	Interação da matéria com a REM .....	24
2.1.4	Absorção, Reflectância e Radiância .....	25
2.1.5	Fluorescência de Raios X (FRX).....	26
2.1.6	Sensores e Plataformas .....	28
2.1.7	Bibliotecas espectrais .....	29
2.2	Contexto Geológico.....	30
2.2.1	O Craton São Francisco .....	30
2.2.2	O Quadrilátero Ferrífero.....	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	34
3.1	Levantamento de campo .....	34
3.2	Preparação e descrição das Amostras .....	34
3.3	Aquisição de dados espectrais .....	36
3.4	Processamento de Dados Espectrais.....	36
3.5	Geoquímica.....	38
4	RESULTADOS .....	40

4.1	Caracterização das Amostras.....	40
4.2	Curvas Espectrais das Amostras de Rocha.....	43
4.3	Comparação com a Biblioteca Espectral do SGB .....	50
4.4	Análise das curvas espectrais das amostras de solo .....	54
4.5	Resultados da química por FRX.....	59
5	DISCUSSÃO.....	62
5.1	Controle litológico na resposta espectral.....	62
5.2	A assinatura do intemperismo férrico.....	63
5.3	Evolução pedogenética e relação solo-rocha.....	63
5.4	Síntese da discussão e implicações para a biblioteca espectral .....	65
6	CONCLUSÃO .....	67
	REFERÊNCIAS .....	68
	ANEXOS .....	73

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 APRESENTAÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QFe), localizado na porção central do estado de Minas Gerais, é uma das províncias geológicas mais estudadas e conhecidas do Brasil, amplamente reconhecido por sua importância econômica, ambiental, cultural e paisagística. Sua relevância histórica e econômica está associada principalmente à longa tradição de mineração, com destaque para a exploração de ouro e minério de ferro, que ocorre há mais de três séculos e resultou em profundo conhecimento geológico e econômico da região. Além disso, o QFe abriga importantes unidades de conservação e apresenta diversidade paisagística singular, marcada por escarpas quartzíticas, topos de serras cobertos por cangas ferruginosas e campos rupestres (Endo *et al.*, 2020).

Os campos rupestres, típicos dessa região, são ecossistemas que se desenvolvem sobre substratos geológicos específicos, como quartzitos e formações ferruginosas. Apresentam vegetação herbácea e arbustiva altamente heterogênea, com elevada biodiversidade e alto grau de endemismo. Essas características resultam de condições ambientais restritivas, incluindo solos pouco desenvolvidos e pobres em nutrientes, elevada exposição solar, ampla variação térmica diária e sazonal, além de acentuado relevo (Fernandes *et al.*, 2014; Fernandes *et al.*, 2016). Atualmente, esses ambientes encontram-se cada vez mais ameaçados pela expansão de atividades antrópicas, como urbanização, mineração e alterações no uso do solo, levando à perda de biodiversidade, fragmentação de habitats e comprometimento de suas funções ecológicas (Yan *et al.*, 2013; Sousa *et al.*, 2020).

O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto oferece novas possibilidades para lidar com esses desafios, ampliando a capacidade de caracterização da superfície terrestre. Entre os recursos disponíveis, destacam-se os sensores hiperespectrais, que registram centenas ou milhares de bandas ao longo do espectro eletromagnético, possibilitando análises detalhadas das propriedades físico-químicas dos materiais. Equipamentos como o FieldSpec, utilizado em coletas de campo, têm sido amplamente empregados em estudos ambientais e geológicos por sua alta resolução espectral e portabilidade (Reif; Theel, 2017).

A espectrorradiometria, aplicada por meio desses sensores, baseia-se na leitura da radiação eletromagnética refletida pelos materiais em diferentes comprimentos de onda. Essa

interação gera curvas espectrais características, ou assinaturas espectrais, que refletem processos eletrônicos na região do visível e do infravermelho próximo (VNIR) e vibracionais no infravermelho de ondas curtas (SWIR). Essas feições espectrais estão diretamente relacionadas à composição mineralógica e química dos alvos, permitindo inferências confiáveis sobre sua natureza (Baptista, 2006; Meneses; Almeida, 2019).

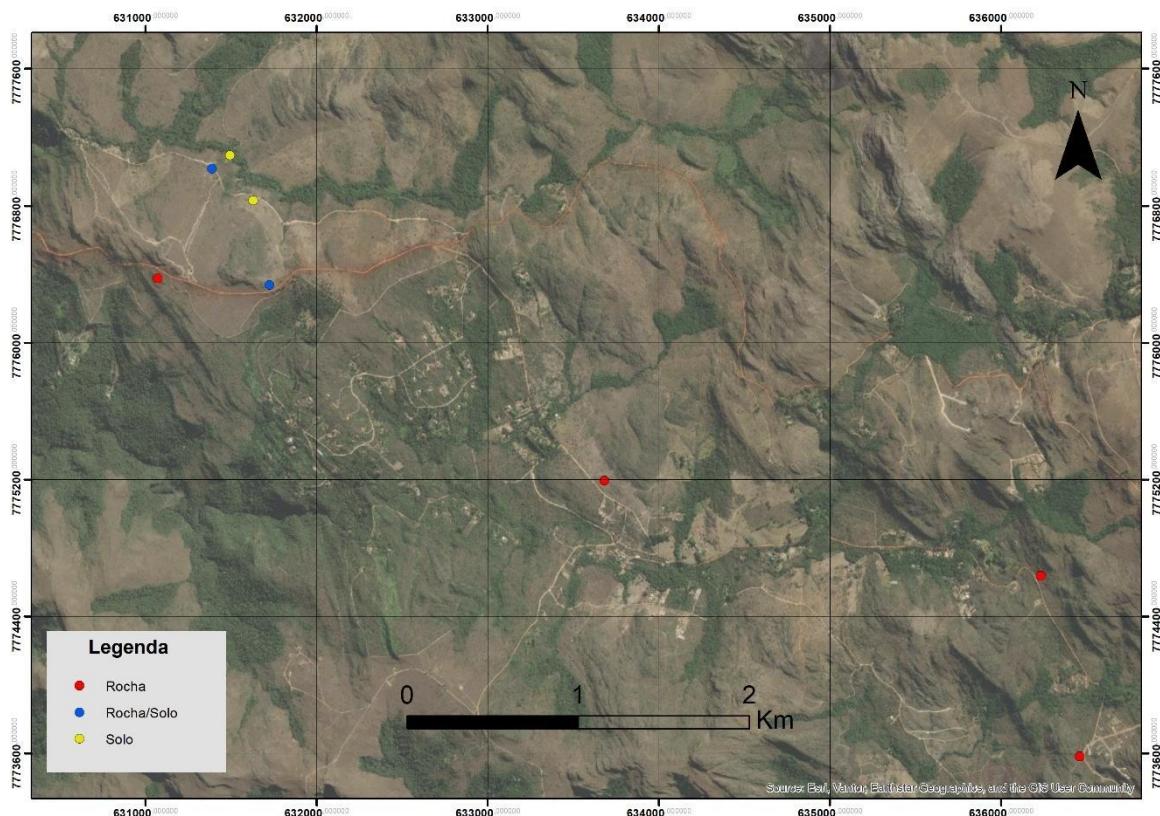
Embora a técnica seja amplamente aplicada em mapeamento geológico, exploração mineral, análise de solos e vegetação e monitoramento ambiental, seu uso em ambientes específicos, como os campos rupestres quartzíticos, ainda é limitado. A homogeneidade litológica e a fragilidade ecológica dessas áreas demandam métodos de caracterização não destrutivos e de alta resolução, o que reforça a relevância de estudos nessa linha.

A área de estudo está situada nos arredores do município de Rio Acima, Minas Gerais, em uma zona de campos rupestres desenvolvidos sobre os quartzitos da Formação Casa Forte, pertencente ao Grupo Maquiné do Supergrupo Rio das Velhas. Essa unidade litológica sustenta ecossistemas de vegetação campestre pouco explorados sob a ótica espectral. Este trabalho busca contribuir com a construção de uma biblioteca espectral específica para solos e rochas dessa região, preenchendo uma lacuna relevante para o avanço das aplicações do sensoriamento hiperespectral em ambientes rupestres. Espera-se que os dados gerados sirvam como base para estudos futuros voltados ao mapeamento, ao monitoramento de alterações na cobertura vegetal e ao suporte a estratégias de recuperação ambiental.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo (Figura 1) localiza-se a sudeste do município de Rio Acima, Minas Gerais, na porção setentrional do Quadrilátero Ferrífero (QFe). Os pontos de coleta foram distribuídos em afloramentos representativos da região, onde ocorrem campos rupestres desenvolvidos sobre quartzitos da Formação Casa Forte, pertencente ao Grupo Maquiné do Supergrupo Rio das Velhas. A identificação das amostras e a localização geográfica dos pontos de coleta, expressas em coordenadas UTM, são apresentadas no Anexo A, enquanto a distribuição dos pontos de amostragem no mapa geológico é apresentada no Anexo B.

Figura 1: Mapa de localização dos pontos de amostragem na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é construir uma biblioteca espectral de solos e rochas associadas a campos rupestres e quartzitos, localizados na porção sudeste do município de Rio Acima, com vistas a caracterizar o comportamento espectral desses materiais e estabelecer uma base de dados de referência para subsidiar futuros estudos de monitoramento ambiental e prospecção mineral.

Para alcançar esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Correlacionar os dados espetrais obtidos em campo com os resultados das análises geoquímicas, de modo a identificar relações entre a composição química e o comportamento espectral dos materiais analisados;
- Desenvolver e aplicar uma ferramenta computacional própria para o processamento,

organização e análise sistemática dos dados espectrais.

- Descrever e interpretar as principais feições de absorção presentes nos espectros de solos e rochas, visando à identificação das fases mineralógicas dominantes;
- Avaliar o potencial dos dados espectrais como ferramenta auxiliar na caracterização de materiais típicos de ambientes de campos rupestres quartzíticos.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Os campos rupestres são ecossistemas de elevado valor ecológico, caracterizados por solos rasos, vegetação especializada e substratos rochosos resistentes, como os quartzitos. Apesar de sua importância, esses ambientes vêm sendo pressionados por diversas atividades antrópicas, incluindo expansão urbana, abertura de acessos e mineração, resultando em fragmentação, degradação e perda de funcionalidade ecológica.

O Quadrilátero Ferrífero destaca-se como uma das principais províncias geológicas e minerais do Brasil, apresentando grande diversidade litológica e elevado potencial econômico. A presença de extensas unidades quartzíticas aflorantes, associadas tanto a contextos preservados quanto a áreas sob diferentes graus de intervenção antrópica, torna a região particularmente relevante para estudos que integrem caracterização geológica, ambiental e métodos de sensoriamento remoto.

A área de estudo localizada no município de Rio Acima foi selecionada de forma estratégica por concentrar afloramentos quartzíticos representativos dos ambientes de campos rupestres do Quadrilátero Ferrífero e por já contar com dados pontuais de espectrorradiometria adquiridos no âmbito de projetos conduzidos pelo Serviço Geológico do Brasil, os quais foram utilizados neste trabalho como referência comparativa. Adicionalmente, a região foi alvo de aerolevantamentos recentes realizados pelo mesmo órgão, cujos produtos, quando disponibilizados, poderão ser integrados aos dados espectrais de campo gerados neste estudo, ampliando seu potencial de aplicação.

Nesse contexto, a espectrorradiometria de reflectância constitui uma abordagem não destrutiva e de alta resolução para a análise mineralógica e composicional de materiais naturais. A interação da radiação eletromagnética com a superfície dos alvos permite a

obtenção de curvas espectrais que refletem sua composição, com destaque para o intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas (VNIR–SWIR), no qual ocorrem feições de absorção diagnósticas associadas a minerais como óxidos e hidróxidos de ferro, filossilicatos e minerais hidratados (Bedini, 2017).

Apesar dos avanços no uso do sensoriamento remoto aplicado às geociências, ainda são escassos os estudos que empregam a espectrorradiometria de campo para a caracterização de ambientes de campos rupestres no Quadrilátero Ferrífero. Essa lacuna limita a aplicação da técnica em contextos nos quais seu potencial poderia ser explorado com maior profundidade, tanto em estudos ambientais quanto em investigações voltadas à prospecção mineral.

A construção de uma biblioteca espectral fundamentada em dados de campo, associada à variabilidade litológica e pedológica observada na área de estudo, tem potencial para subsidiar o mapeamento geológico, o monitoramento ambiental, a identificação de áreas degradadas e a integração com produtos de sensoriamento remoto orbital e aerotransportado, contribuindo também para futuras iniciativas de compensação ambiental (Peyghambari; Zhang, 2021).

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

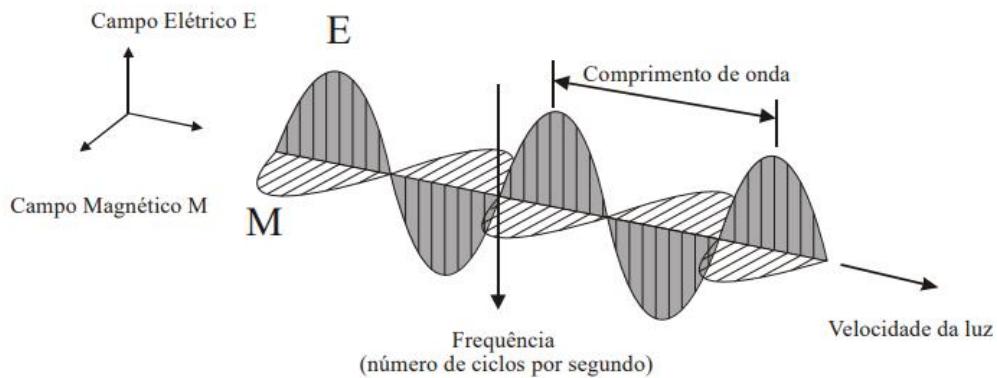
### 2.1 PRINCÍPIOS DO SENSORIAMENTO REMOTO

Segundo Meneses e Almeida (2012), o sensoriamento remoto (SR) é a ciência que desenvolve e aplica técnicas para adquirir imagens da superfície terrestre por meio da análise quantitativa das interações entre a matéria e a radiação eletromagnética (REM). Essas interações são registradas por sensores ativos ou passivos posicionados em diferentes plataformas, como terrestres, aéreas ou orbitais. Essa definição delimita o SR às técnicas baseadas exclusivamente nessas interações, excluindo, portanto, métodos como levantamentos aerogravimétricos e aeromagnéticos, que, embora também não exijam contato direto com o alvo, utilizam outros princípios físicos para a aquisição de dados.

#### 2.1.1 A RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Para compreender os fundamentos do sensoriamento remoto, é necessário, primeiramente, entender a natureza da radiação eletromagnética, já que é a interação dessa energia com a matéria que permite a aquisição e interpretação das imagens. A radiação eletromagnética, conforme previsto pelas equações de James Clerk Maxwell, consiste em oscilações simultâneas e em fase dos campos elétrico (E) e magnético (M), que se sustentam mutuamente e vibram de forma perpendicular à direção de propagação da onda (Figura 2). No vácuo, essas ondas propagam-se à velocidade constante da luz (c), aproximadamente  $2,9979 \times 10^8$  m/s. (Janssen; Huurneman, 2001, cap 2).

Figura 2: Representação esquemática de uma onda eletromagnética se propagando no vácuo, composta por campos elétrico (E) e magnético (M) oscilando em planos mutuamente perpendiculares e perpendiculares à direção de propagação (c).



Fonte: Retirado de Meneses e Almeida, 2012

Um parâmetro essencial para a compreensão da interação das ondas eletromagnéticas com a matéria é o comprimento de onda ( $\lambda$ ), definido como a distância espacial entre cristas sucessivas da onda. Habitualmente, o comprimento de onda é medido em metros (m) ou em unidades derivadas, como nanômetros (nm, 10-9) e micrômetros ( $\mu\text{m}$ , 10-6). Outro parâmetro relevante é a frequência ( $\nu$ ), que expressa o número de ciclos completos que uma onda realiza ao passar por um ponto fixo durante um intervalo de tempo específico. A unidade padrão para frequência é o hertz (Hz), correspondente a um ciclo por segundo. Sendo a velocidade da luz constante, o comprimento de onda e a frequência possuem relação inversamente proporcional, descrita matematicamente pela seguinte expressão:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

em que  $c$  representa a velocidade da luz,  $\lambda$  o comprimento de onda e  $\nu$  a frequência da onda eletromagnética. Consequentemente, ondas com menores comprimentos de onda possuem frequências maiores, ao passo que ondas com maiores comprimentos têm frequências menores. (Meneses; Almeida, 2019, cap 1; Lillesand *et al.*, 2015)

Apesar de a maior parte das propriedades da radiação eletromagnética poder ser satisfatoriamente explicada com base no modelo ondulatório, determinadas aplicações, especialmente aquelas voltadas à quantificação da energia transportada pela radiação, exigem uma abordagem complementar. Segundo a mecânica quântica, a radiação eletromagnética pode ser interpretada como composta por partículas elementares

denominadas fótons, que representam os quanta do campo eletromagnético. Essa descrição é particularmente relevante em contextos como o sensoriamento multiespectral, no qual se busca mensurar a quantidade de energia incidente em diferentes faixas espectrais (Jensen, 2009).

A energia associada a um fóton ( $Q$ ) é diretamente proporcional à frequência da radiação ( $\nu$ ) e pode ser expressa pela equação:

$$Q = h \cdot \nu = h \times \frac{c}{\lambda}$$

em que  $h$  é a constante de Planck ( $6,6262 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ),  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação. A partir dessa relação, observa-se que comprimentos de onda menores correspondem a fótons mais energéticos, enquanto comprimentos de onda maiores resultam em menor energia por fóton. Por exemplo, os raios gama, com comprimentos de onda da ordem de  $10^{-9} \text{ m}$ , são extremamente energéticos. Por outro lado, as ondas de rádio, com comprimentos superiores a 1 metro, apresentam energia significativamente mais baixa.

Essa variação no conteúdo energético da radiação eletromagnética tem implicações diretas no SR, especialmente nas faixas de maior comprimento de onda, onde a energia emitida pela superfície terrestre é menor. Nesses casos, a detecção exige sensores com alta sensibilidade para garantir medições confiáveis. Além disso, diferentes comprimentos de onda interagem de formas distintas com a matéria. Por exemplo, a radiação no infravermelho próximo pode ser bloqueada por vapor d'água presente nas nuvens, enquanto ondas de radar, com comprimentos de onda muito maiores, conseguem atravessá-las com relativa facilidade (Janssen; Huurneman, 2001; Jensen, 2009).

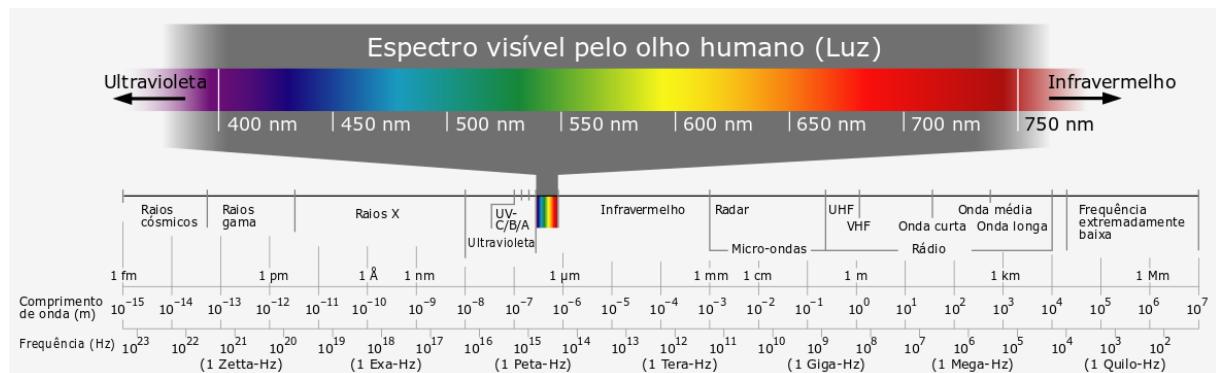
### 2.1.2 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Compreendida a natureza física da radiação eletromagnética, o passo seguinte é examinar sua organização no espectro eletromagnético. Essa distribuição é fundamental, pois diferentes faixas espectrais interagem de maneira distinta com a matéria e apresentam potencial específico para a detecção remota. Todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação eletromagnética como resultado da agitação térmica de suas

partículas. À medida que a temperatura aumenta, modificam-se tanto a intensidade quanto a distribuição da radiação emitida ao longo dos comprimentos de onda. Essa emissão é contínua e abrange desde os raios gama, de comprimentos extremamente curtos, até as ondas de rádio, que apresentam os comprimentos mais longos.

O espectro eletromagnético (figura 3) é segmentado em regiões que apresentam propriedades distintas de interação com a matéria. Entre elas, a região óptica se destaca por incluir comprimentos de onda descritos pelas leis da óptica e que abrangem o ultravioleta (UV), a luz visível, o infravermelho próximo (VNIR) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR), aproximadamente de 0,02  $\mu\text{m}$  a 2,5  $\mu\text{m}$  (Lillesand *et al.*, 2015).

Figura 3: Espectro eletromagnético completo com o visível em destaque.



Fonte: Arte por Horst, Frank e Jailbird, Alebergen.

A faixa do ultravioleta, situada logo além do limite violeta da luz visível, pode induzir certos materiais, como minerais e rochas, a emitir luz visível por fluorescência. Já a radiação visível corresponde à porção do espectro perceptível ao olho humano e permite a distinção de cores, sendo o azul, o verde e o vermelho os comprimentos de onda primários responsáveis pela formação das demais tonalidades.

Em comprimentos de onda maiores, encontram-se o infravermelho térmico (TIR), que se estende de cerca de 8 a 14  $\mu\text{m}$ , e a região das micro-ondas, que vai de aproximadamente 1 mm a 1 m. Essas faixas são particularmente úteis para investigações sobre temperatura de superfície, rugosidade e umidade de materiais, devido às suas características específicas de emissão, penetração e interação com a matéria (Jensen, 2009; Lillesand *et al.*, 2015).

### 2.1.3 INTERAÇÃO DA MATÉRIA COM A REM

A interação da radiação eletromagnética (REM) com a matéria pode ocorrer de diferentes formas, dependendo tanto da natureza da superfície quanto das características da radiação incidente. Essas interações são fundamentais para a interpretação de dados em sensoriamento remoto, uma vez que determinam como a energia é refletida, absorvida ou transmitida pelos alvos observados (Lillesand *et al.*, 2015).

De forma geral, os processos de interação podem ser classificados em dois tipos principais: interações macroscópicas e interações microscópicas. As interações macroscópicas ocorrem quando a relação entre o comprimento de onda da radiação e as dimensões físicas da superfície do alvo controla o comportamento da energia refletida. Nesse caso, a textura da superfície, entendida como a variação topográfica em pequena escala, exerce papel determinante na forma como a radiação é redirecionada (Meneses; Almeida, 2012, cap. 1). Superfícies relativamente lisas, quando comparadas ao comprimento de onda incidente, tendem a refletir a radiação de maneira espelhada, ou seja, de forma direcionada, semelhante a um espelho. Já superfícies rugosas promovem uma reflexão difusa, dispersando a radiação em múltiplas direções (Janssen; Huurneman, 2001, cap. 2).

Na prática, raramente se observa um comportamento puramente espelhado ou puramente difuso. A maioria das superfícies naturais apresenta uma combinação desses dois tipos, e o grau de cada um depende da rugosidade relativa da superfície em comparação ao comprimento de onda incidente, bem como do ângulo de incidência. Por exemplo, uma superfície de solo arado pode ser considerada rugosa na faixa do visível, cujo comprimento de onda é da ordem de micrômetros, mas pode parecer lisa para as micro-ondas, cujos comprimentos são da ordem de centímetros. Essa diferença resulta em imagens com características distintas nas duas faixas espectrais. O desconhecimento dessas relações pode levar a interpretações equivocadas das imagens, como supor que áreas com a mesma textura foram adquiridas em momentos distintos ou sob condições diferentes (Meneses; Almeida, 2012, cap. 1).

O segundo tipo de interação é denominado microscópico e está relacionado à absorção seletiva da energia da radiação por átomos ou moléculas. Nesse caso, a interação depende da correspondência entre a energia do fóton incidente e a diferença de energia entre dois níveis eletrônicos de um átomo ou molécula. Quando essa condição é satisfeita, ocorre

a absorção, promovendo transições eletrônicas. Como essas transições são específicas para cada substância, materiais com composições químicas distintas apresentam padrões característicos de absorção e reflectância, que podem ser detectados por sensores multiespectrais e hiperespectrais (Lillesand *et al.*, 2015).

O modelo corpuscular, que considera a radiação composta por fótons, é mais adequado para explicar as interações microscópicas em faixas de alta energia, como o ultravioleta, o visível e o infravermelho próximo. Já em faixas de baixa energia, como as micro-ondas, a energia dos fótons é insuficiente para provocar transições eletrônicas, e a interação ocorre predominantemente em escala macroscópica, sendo melhor descrita pelo modelo ondulatório (Jensen, 2009; Lillesand *et al.*, 2015).

#### 2.1.4 ABSORÇÃO, REFLECTÂNCIA E RADIÂNCIA

A radiação eletromagnética que incide sobre um alvo pode ser refletida, absorvida ou transmitida. No contexto do sensoriamento remoto, o interesse principal recai sobre as parcelas refletida ou emitida, pois são essas que carregam informações sobre as propriedades físicas e químicas da superfície observada. A absorção ocorre quando a radiação eletromagnética é retida por átomos ou moléculas e convertida em outras formas de energia, geralmente calor. Esse processo acontece quando a radiação incidente possui frequência igual ou próxima à frequência de ressonância de um elemento ou composto, promovendo a excitação eletrônica. Ao retornar ao estado fundamental, a energia pode ser dissipada como calor ou reemitida em um comprimento de onda maior. A absorção pode ocorrer tanto na atmosfera quanto na superfície terrestre. Na atmosfera, gases como vapor d'água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), ozônio ( $O_3$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) apresentam faixas específicas de absorção, chamadas bandas de absorção atmosférica, que reduzem fortemente a transmissão da radiação. Nessas regiões, a transmissão pode ser tão baixa que fecha determinadas faixas do espectro para sensoriamento remoto. As regiões de maior transparência são denominadas janelas atmosféricas e correspondem às faixas preferenciais para operação de sensores (Lillesand *et al.*, 2015; Jensen, 2009). Na superfície terrestre, diferentes materiais apresentam padrões específicos de absorção relacionados à sua composição química e estrutura molecular. A clorofila nas plantas, por exemplo, absorve fortemente a radiação nas faixas do azul e do vermelho para a fotossíntese, enquanto a água apresenta forte absorção no infravermelho próximo e médio. Minerais também possuem bandas diagnósticas de absorção que permitem sua identificação espectral, desde que não estejam cobertos por

vegetação ou solo (Clark, 1999).

A reflectância, por sua vez, corresponde à fração da radiação eletromagnética incidente que é redirecionada pela superfície. Em sensoriamento remoto, é especialmente relevante a reflectância espectral, definida como a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente em um comprimento de onda específico. Quando corrigida dos efeitos atmosféricos e geométricos, a reflectância espectral permite comparações diretas entre diferentes alvos e condições de aquisição. A reflexão pode ocorrer de forma especular, quando a superfície é lisa em relação ao comprimento de onda da radiação incidente, como corpos d'água calmos, ou de forma difusa, quando a superfície é rugosa e dispersa a radiação em múltiplas direções, como no caso de solos secos ou vegetação densa. Uma superfície lambertiana, idealizada para simplificação de modelos, reflete a radiação igualmente em todas as direções (Meneses; Almeida, 2012). Na prática, os alvos naturais raramente apresentam reflexão puramente difusa ou puramente especular, exibindo comportamentos intermediários que variam conforme a rugosidade, o teor de umidade e o comprimento de onda considerado.

A radiância ( $L\lambda$ ) é a grandeza registrada pelos sensores e representa a quantidade de radiação eletromagnética emitida ou refletida por uma superfície, em uma direção específica, por unidade de área projetada e por unidade de ângulo sólido, em determinado comprimento de onda. É expressa em watts por metro quadrado por esterradiano por micrômetro ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ). Como apenas a radiação que entra no campo de visão do sensor é medida, fenômenos como espalhamento atmosférico ou reflexos de áreas vizinhas podem afetar o registro, tornando necessárias etapas de calibração e correção atmosférica para obtenção da reflectância real.

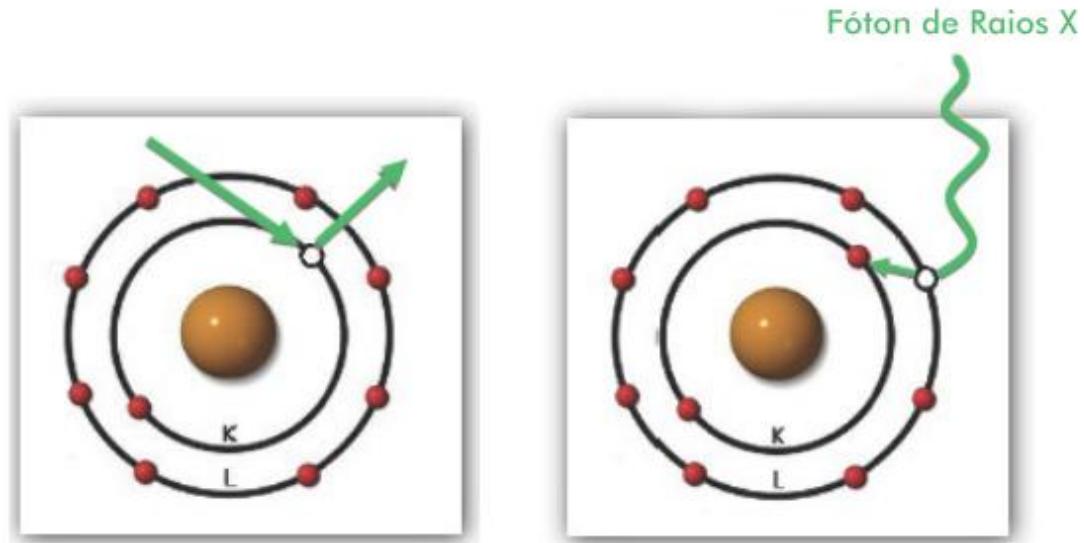
A interação combinada entre absorção e reflectância define a resposta espectral de um material ao longo do espectro eletromagnético. Em um gráfico dessa variação, conhecido como curva espectral, as bandas de absorção se manifestam como quedas acentuadas na reflectância, enquanto os picos indicam regiões de maior retorno da radiação. Esse padrão, característico para cada tipo de material, constitui a base para sua identificação e discriminação em dados multiespectrais e hiperespectrais.

### 2.1.5 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

A fluorescência de raios X é uma técnica analítica não destrutiva amplamente

empregada em estudos geoquímicos pela capacidade de determinar concentrações elementares com boa precisão e reduzido preparo de amostras. Seu princípio baseia-se na interação entre um feixe primário de raios X e os átomos presentes no material. Quando a radiação incidente possui energia suficiente, ela promove a ejeção de elétrons das camadas internas, gerando um estado excitado e instável. O retorno ao estado fundamental ocorre pela transição de elétrons de camadas externas, processo que libera fótons de raios X com energias características de cada elemento, permitindo sua identificação e quantificação (Figura 4) (Jenkins, 1999; Brouwer, 2003).

Figura 4: Representação esquemática do processo de FRX. O feixe de raios X primário ejeta um elétron de uma camada interna do átomo, gerando uma vacância. A transição de um elétron de maior energia para preencher essa vacância resulta na emissão de um fóton de raios X característico do elemento.



Fonte: Manual ARL 9900 Intellipower Series, Nº AA83654-02, Thermo Fisher Scientific, 2007

A eficiência desse processo depende do número atômico, da energia do feixe primário e das propriedades da matriz, fatores que influenciam tanto o rendimento de fluorescência quanto a atenuação da radiação ao longo do caminho ótico. Elementos leves apresentam emissões menos intensas, enquanto elementos de número atômico intermediário e alto apresentam sinais mais fortes e facilmente detectáveis (Rollinson, 2014).

A radiação fluorescente emitida pode ser analisada por dois arranjos principais: dispersão em energia e dispersão em comprimento de onda. Na técnica de dispersão em energia, os fótons são detectados por semicondutores que convertem suas energias em pulsos

elétricos proporcionais. Na dispersão por comprimento de onda, cristais monocromadores separam comprimentos de onda específicos segundo a lei de Bragg, permitindo maior resolução espectral e melhor distinção entre linhas próximas (Jenkins, 1999; Brouwer, 2003).

### 2.1.6 SENSORES E PLATAFORMAS

Os sensores de sensoriamento remoto dividem-se em passivos e ativos. Sensores passivos registram a radiação natural refletida ou emitida pelos alvos, geralmente proveniente do Sol. Sensores ativos, como sistemas de radar (SAR) e LiDAR, emitem sua própria radiação e medem o retorno, permitindo aquisição de dados mesmo na ausência de iluminação solar (Lillesand *et al.*, 2015; Jensen, 2009).

Além dessa distinção, os sensores passivos podem ser classificados quanto à resolução espectral em multiespectrais e hiperespectrais. Os sensores multiespectrais registram a radiação refletida em um número limitado de bandas relativamente largas, geralmente entre 5 e 12, com larguras na ordem de centenas de nanômetros, sendo amplamente utilizados para a identificação e mapeamento de alvos como tipos de cobertura vegetal, corpos d'água, solos e rochas (Baptista, 2006). Sensores multiespectrais registram a radiação em poucas bandas largas (geralmente 5 a 12), com larguras de centenas de nanômetros, sendo indicados para mapeamentos gerais de cobertura vegetal, água, solos e rochas (Baptista, 2006). Sensores hiperespectrais registram centenas de bandas estreitas e contíguas (5 a 20 nm), formando espectros quase contínuos, capazes de detectar variações sutis na reflectância e identificar com mais precisão composição mineral e química (eg. van der Meer *et al.*, 2012).

A escolha entre dados multiespectrais e hiperespectrais depende diretamente dos objetivos do estudo e dos requisitos de discriminação espectral. Em geociências, sensores hiperespectrais são particularmente úteis para a caracterização mineralógica detalhada, enquanto sensores multiespectrais tendem a ser mais empregados em aplicações de monitoramento de maior escala espacial e menor custo operacional.

Quanto às plataformas de aquisição, os sensores podem ser embarcados em satélites (plataformas orbitais), aeronaves tripuladas, veículos aéreos não tripulados (VANTs) ou instalados em dispositivos terrestres. Satélites como Landsat-8/9 e Sentinel-2 são exemplos de sensores multiespectrais amplamente utilizados. Sistemas hiperespectrais podem ser

operados a partir de aeronaves, como o HyMap e o AVIRIS, ou em modo terrestre, com espectrorradiômetros portáteis que permitem a aquisição direta de assinaturas espectrais em campo, fundamentais para a calibração e validação de dados obtidos por plataformas aéreas ou orbitais.

A utilização dessas diferentes plataformas e sensores está diretamente relacionada à geração e aplicação de bibliotecas espectrais. A coleta sistemática de dados de reflectância em campo, especialmente por meio de espectrorradiômetros portáteis, permite registrar assinaturas espectrais precisas de litotipos específicos, que servirão como referência para a interpretação de dados adquiridos por sensores aéreos e orbitais. Assim, a compreensão das características e limitações de cada tipo de sensor é essencial para assegurar que as bibliotecas espectrais resultem em classificações mais confiáveis e na correta identificação dos alvos geológicos em estudos posteriores.

#### 2.1.7 BIBLIOTECAS ESPECTRAIS

Bibliotecas espectrais são conjuntos organizados de curvas de reflectância que descrevem, de forma sistemática, como diferentes materiais interagem com a radiação eletromagnética em distintas faixas do espectro. Esses acervos constituem uma base fundamental para a interpretação e classificação de dados obtidos por sensoriamento remoto, permitindo a comparação entre assinaturas espectrais medidas em campo ou laboratório e aquelas adquiridas por sensores orbitais ou aéreos.

A construção de uma biblioteca espectral envolve a coleta de amostras representativas, a obtenção das curvas de reflectância com instrumentos adequados, como espectrorradiômetros, e o processamento dos dados para padronização e armazenamento. Esse processo demanda cuidado na preparação e no registro das informações associadas, como localização, litologia e condições de aquisição, a fim de garantir a reproduzibilidade e a confiabilidade das medições (Clark *et al.*, 2007).

No contexto geológico, bibliotecas espectrais têm sido aplicadas com sucesso na caracterização de litotipos e minerais. Sgavetti *et al.* (2006), por exemplo, utilizaram espectroscopia de reflectância na faixa de 0,3–2,5  $\mu\text{m}$  para identificar rochas metamórficas e sedimentares nos Apeninos italianos, destacando diferenças sutis de absorção e reflectância associadas à composição mineralógica. Woldai (2013) também demonstrou o potencial da espectroscopia SWIR na análise de rochas de baixo grau metamórfico no Cráton Pilbara,

Austrália, evidenciando a relação entre mineralogia e zonas metamórficas. Esses estudos ilustram como bibliotecas bem estruturadas permitem a distinção de unidades geológicas e a detecção de minerais-chave, mesmo em áreas de difícil acesso.

A criação de bibliotecas locais apresenta vantagens específicas, já que as assinaturas espectrais podem variar de acordo com fatores como composição mineral, intemperismo e presença de revestimentos superficiais. Trabalhos realizados em ambientes ferruginosos do Quadrilátero Ferrífero, como o de Oliveira (2025), ilustram a aplicação prática dessa abordagem na caracterização espectral de cangas ferruginosas e quartzitos, destacando a importância de dados obtidos em condições representativas da realidade local para subsidiar interpretações mais precisas de dados hiperespectrais.

A elaboração de bibliotecas espectrais locais é especialmente relevante em áreas geologicamente complexas, como o Quadrilátero Ferrífero, onde variações sutis na composição mineralógica podem alterar significativamente a resposta espectral dos materiais. Ao incorporar dados obtidos em condições controladas e representativas da realidade local, essas bibliotecas tornam-se ferramentas indispensáveis para aumentar a acurácia de classificações espectrais e auxiliar na distinção de unidades litológicas em diferentes escalas de mapeamento (Clark *et al.*, 2007; Sgavetti *et al.*, 2006; Abweny *et al.*, 2016).

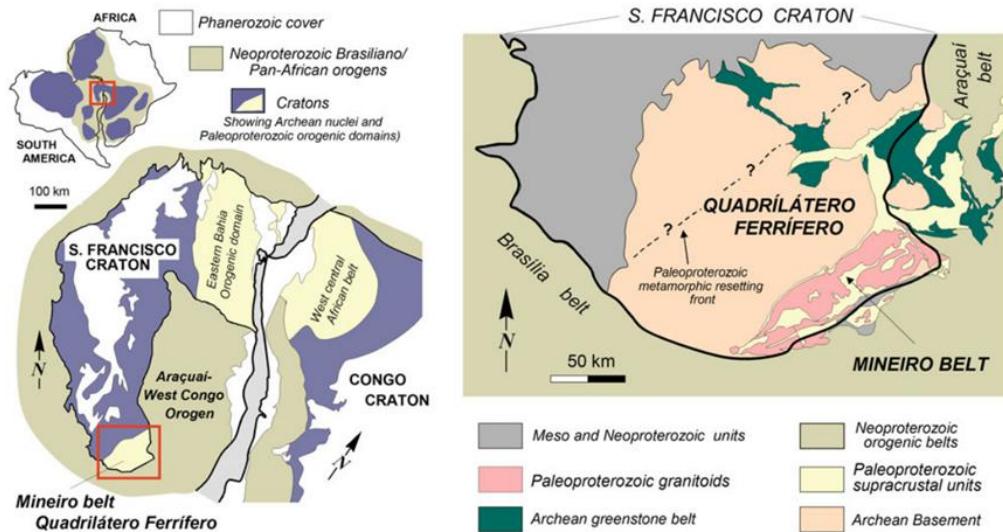
## 2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

O presente trabalho foi realizado no Quadrilátero Ferrífero, que por sua vez está localizado nas adjacências da porção meridional do Cráton São Francisco.

### 2.2.1 O CRATON SÃO FRANCISCO

O Cráton São Francisco, conforme descrito por Almeida (1977), localiza-se principalmente nos estados de Minas Gerais e Bahia e é composto por uma extensa sequência de rochas que permaneceram estáveis durante orogenias do Neoproterozoico e Fanerozoico. Sua base é formada por um núcleo arqueano e dois segmentos orogênicos paleoproterozoicos, sendo circundado pelos orógenos Brasília, Araçuaí, Rio Preto, Sergipano e Riacho do Pontal (Figura 4). Entre suas províncias geotectônicas, destaca-se o Quadrilátero Ferrífero, foco deste trabalho (Almeida *et al.*, 1981; Almeida *et al.*, 2000; Alkmim; Martins-Neto, 2012).

Figura 5: Cráton São Francisco com foco em sua porção meridional destacando o Quadrilátero Ferrífero e os cinturões orogênicos Brasília e Araçuaí.

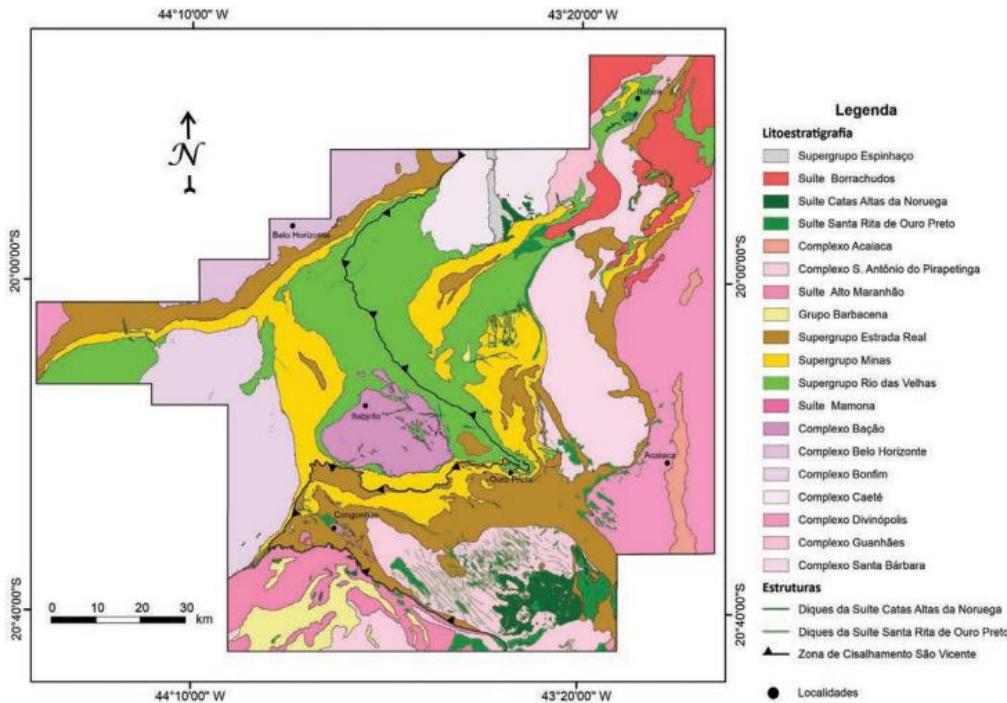


Fonte: Retirado de Alkmim e Teixeira (2016)

### 2.2.2 O QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero (Figura 5) é uma província mineral localizada no sudeste do Brasil, na porção centro-sul de Minas Gerais. Reconhecido pelo elevado potencial metalogenético, abriga um greenstone belt de idade arqueana sobreposto por sequências sedimentares neoarqueanas e paleoproterozoicas, que registram a complexa e multifásica história tectônica da região (Farina *et al.*, 2015; Endo *et al.*, 2020).

Figura 6: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Retirado de Endo *et al.*, 2019

O embasamento cristalino do Quadrilátero Ferrífero é formado por rochas arqueanas do tipo TTG (tonalito, trondhjemito e granodiorito), gnaisses, veios e diques de leucogranitos, pegmatitos e granitos levemente foliados. Esses litotipos ocorrem nos complexos metamórficos Santa Bárbara, Bonfim, Baçao, Divinópolis, Caeté e Belo Horizonte (Carneiro, 1992; Lana *et al.*, 2013; Farina *et al.*, 2015; Farina *et al.*, 2016).

O Supergrupo Rio das Velhas (SGRV), definido por Dorr (1957, 1969), sobrepõe o embasamento cristalino e representa uma sucessão de rochas arqueanas do tipo greenstone belt, composta por rochas maficas e ultramáficas vulcânicas, além de unidades metassedimentares. É subdividido em três grupos principais: Quebra-Osso, Nova Lima e Maquiné (Dorr, 1969; Schorscher, 1978). O Grupo Quebra-Osso é formado predominantemente por rochas metavulcânicas maficas, ultramáficas e félsicas. O Grupo Nova Lima, que o sucede, compreende uma sequência metavulcanossedimentar e metavulcanoclástica. No topo do SGRV, o Grupo Maquiné é caracterizado por uma associação metassedimentar interpretada como fruto de uma deposição não marinha (Baltazar; Zucchetti, 2007; Endo *et al.*, 2020).

De acordo com Endo *et al.* (2019, 2020), o Grupo Maquiné é constituído por duas formações: Palmital e Casa Forte. A Formação Palmital é composta por sericita-filito, quartzo-clorita-xisto e outros tipos de xisto, sendo sobreposta pela Formação Casa Forte, cerne do presente trabalho, caracterizada pela presença de quartzitos, metaconglomerados, sericita-quartzo-xistos e metadiamicítitos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Foi realizada campanha de campo para reconhecimento das áreas-alvo e coleta de amostras, priorizando a variabilidade litológica e pedológica dos materiais aflorantes, de modo a avaliar de que forma essas diferenças se refletem no comportamento espectral. As amostras obtidas foram devidamente acondicionadas e identificadas com etiquetas para garantir transporte seguro e armazenamento adequado.

#### 3.2 PREPARAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

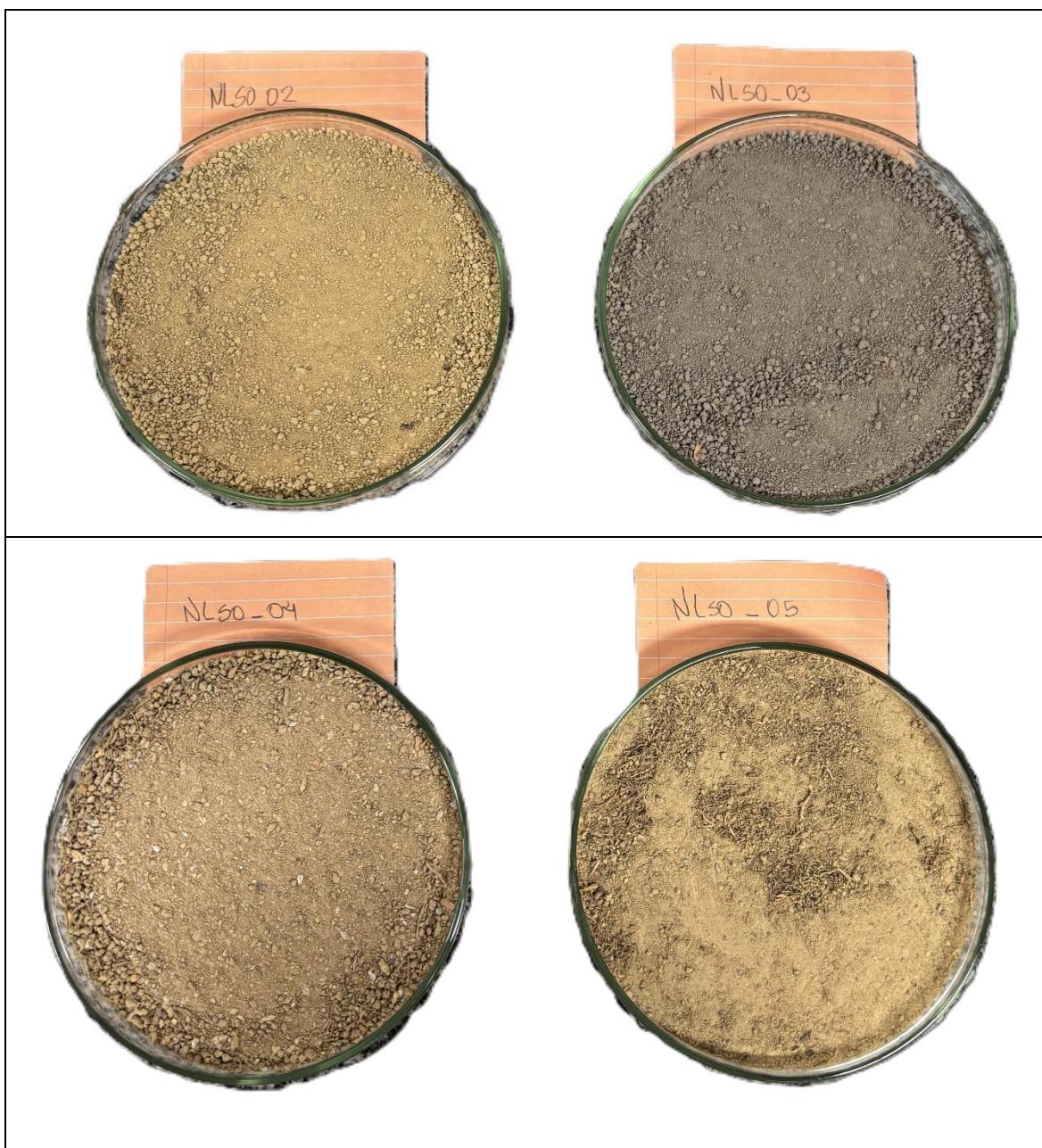
As amostras de rochas e solos utilizadas nas análises espectrais foram secas ao ar livre. No caso dos solos, foi adotado o protocolo da Biblioteca Espectral de Solos do Brasil (BESB), ou seja, foram secas naturalmente, e posteriormente foram destorradadas e posteriormente peneiradas numa malha de 2 mm. Após o peneiramento, no momento da leitura espectral, o material foi colocado em placas de Petri com 12 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura, com a superfície cuidadosamente nivelada para reduzir os efeitos da rugosidade nas medições espectrais.

Quadro 1: Amostras de rocha para leitura espectral.

<b>NLR_01A</b> 	<b>NLR_01B</b> 
<b>NLR_04</b> 	<b>NLR_05</b> 

**NLR\_06****NLR\_07****NLR\_08**

Figura 7: Amostras de solos para leitura espectral



### 3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS ESPECTRAIS

As medições de reflectância nas faixas VNIR-SWIR foram realizadas com o espectrorradiômetro FieldSpec 4 Hi-Res (ASD), que cobre o intervalo espectral de 350 a 2.500 nm, apresentando resolução espectral de 3 nm na faixa VNIR (350 a 1.000 nm) e 8 nm na faixa SWIR (1.000 a 2.500 nm).

As leituras espetrais foram realizadas em ambiente controlado, em sala escura, a fim

de minimizar interferências de fontes externas de luz, seguindo os procedimentos laboratoriais usuais para aquisição de dados espectrais com o equipamento. A geometria de aquisição foi mantida constante ao longo das medições, de modo a reduzir efeitos associados à rugosidade superficial, sombreamento e variações de iluminação.

Para as amostras de rocha, foram realizadas cinco leituras na porção externa da amostra e cinco leituras na porção interna, obtida a partir de superfície recém-exposta, visando avaliar possíveis variações espectrais associadas ao grau de intemperismo. No caso das amostras de solo, foram realizadas cinco leituras por amostra, utilizando-se o acessório turntable (plataforma giratória) acoplado ao FieldSpec, com o objetivo de obter uma resposta espectral média representativa da superfície do material analisado.

Durante a análise dos dados, foram consideradas as regiões de transição entre os detectores do equipamento, especialmente nos intervalos próximos a 1.000 nm e 1.800 nm, onde podem ocorrer efeitos de *splice* característicos do sistema. Esses efeitos estão associados à utilização de múltiplos detectores para a cobertura do intervalo VNIR-SWIR, cujas diferenças de resposta radiométrica podem gerar descontinuidades artificiais nas regiões de junção, não relacionadas à composição mineralógica das amostras. Não foi aplicado tratamento matemático específico para correção dessas regiões, sendo eventuais artefatos instrumentais avaliados de forma crítica durante a interpretação das curvas espectrais.

### **3.4 PROCESSAMENTO DE DADOS ESPECTRAIS**

O processamento inicial dos dados espectrais foi realizado no software *ViewSpec Pro* 6.2, utilizado para o cálculo da média das cinco leituras obtidas para cada amostra e para a conversão dos arquivos do formato proprietário “.asd” para o formato texto “.txt”.

A visualização, organização e análise das curvas espectrais foram conduzidas no software *Hemera*, desenvolvido no âmbito deste trabalho como uma ferramenta de uso livre voltada ao tratamento e à interpretação de dados espectrais de alta resolução. A adoção de um software próprio decorreu de limitações observadas em pacotes comerciais usualmente empregados na análise espectral, os quais, além de demandarem licenças proprietárias de alto custo, apresentaram restrições operacionais relevantes para os objetivos deste estudo, como dificuldades de importação de dados, instabilidades de interface e baixa flexibilidade na customização gráfica.

O *Hemera* foi empregado na inspeção gráfica das curvas espetrais, na organização do conjunto amostral, na comparação entre leituras internas e externas e na identificação de feições de absorção ao longo do intervalo VNIR-SWIR. O software permite a aplicação de filtragem por *Savitzky–Golay* para redução de ruído espectral e a remoção do contínuo pelo método *convex hull*, a partir da qual são determinados os centros de absorção das feições identificadas.

A interpretação mineralógica foi conduzida com base na literatura especializada, conforme descrito em Meneses e Almeida (2019); Hunt (1970,1971) e complementada pela comparação dos espectros obtidos com bibliotecas espetrais disponibilizadas pelo Serviço Geológico do Brasil.

### **3.5 GEOQUÍMICA**

A caracterização geoquímica foi conduzida no Laboratório de Técnicas Analíticas do Centro de Tecnologia de Ferrosos da Vale, por meio de fluorescência de raios X, utilizando um analisador portátil Niton XL5 Plus Handheld XRF Analyzer. No caso dos solos, as amostras foram previamente homogeneizadas, de modo a assegurar a representatividade do material analisado, sendo realizadas duas leituras por amostra. As rochas, por sua vez, foram analisadas diretamente sobre a amostra bruta, sem preparação por corte ou polimento. Foram realizadas três leituras pontuais distribuídas em diferentes faces de cada amostra, abrangendo tanto superfícies de exposição natural quanto zonas de quebra fresca, seguidas do cálculo da média das concentrações obtidas. As concentrações elementares foram determinadas com base nas calibrações internas do equipamento para o modo *mining*, seguindo parâmetros analíticos usuais para materiais geológicos.

Os metadados associados às amostras analisadas, incluindo tipo de material, condição da superfície, preparo, tempo de secagem e número de leituras, encontram-se sintetizados na Tabela 1, enquanto as leituras individuais utilizadas no cálculo das médias são apresentadas no Anexo C.

Tabela 1: Metadados das amostras analisadas neste estudo, incluindo material, litologia, condição das superfícies analisadas, preparo e tempo de secagem, número de leituras espectrais e geoquímicas e coordenadas UTM.

Amostra	Material	Condição das superfícies analisadas	Preparação da amostra	Tempo de secagem	Nº de leituras espectrais	Nº de leituras FRX	UTM X (m)	UTM Y (m)
NLR-01A	Quartzito	Superfície alterada e quebra natural	Secagem natural	7 dias	10	3	631073,8394	7776374,24
NLR-01B	Quartzito	Superfície alterada e quebra natural	Secagem natural	7 dias	10	3	631073,8394	7776374,24
NLR-04	Quartzito micáceo	Superfície alterada e quebra natural	Secagem natural	7 dias	10	3	631725,1066	7776336,43
NLR-05	Quartzito micáceo a quartzo-mica xisto	Superfície alterada e quebra natural	Secagem natural	7 dias	10	3	633682,9671	7775194,76
NLR-06	Quartzito micáceo a quartzo-mica xisto	Superfície alterada e quebra natural	Secagem natural	7 dias	10	3	636232,7382	7774637,07
NLR-07	Meta-conglomerado	Superfície alterada e quebra natural	Secagem natural	7 dias	10	3	636459,4018	7773581,71
NLR-08	Filito	Superfície alterada e quebra natural	Secagem natural	7 dias	10	3	631390,3455	7777016,98
NLSO-02	Solo	Material peneirado (2 mm)	Protocolo BESB	7 dias	5	2	631495,5987	7777094,2
NLSO-03	Solo	Material peneirado (2 mm)	Protocolo BESB	7 dias	5	2	631630,5658	7776831,11
NLSO-04	Solo	Material peneirado (2 mm)	Protocolo BESB	7 dias	5	2	631725,1066	7776336,43
NLSO-05	Solo	Material peneirado (2 mm)	Protocolo BESB	7 dias	5	2	631390,3455	7777016,98

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Antes da apresentação dos dados espectrais, foi realizada uma caracterização macroscópica das amostras, cujos resultados são detalhados na Tabela 1. Essa etapa permitiu identificar variações de textura, coloração e grau de alteração que influenciam diretamente o comportamento espectral das diferentes litologias e solos analisados.

Foram analisadas onze amostras provenientes de materiais representativos de ambientes de campo rupestre quartzítico, sendo sete de rocha e quatro de solo. As amostras de rocha correspondem a quartzitos em diferentes estados de alteração, incluindo duas porções coletadas de um mesmo ponto (NLR-1A e NLR-1B), selecionadas para avaliar possíveis variações espectrais decorrentes de diferenças no grau de intemperismo e variação lateral em uma mesma litologia. As demais amostras de rocha (NLR-4, NLR-5, NLR-6, NLR-7 e NLR-8) incluem quartzitos, quartzitos micáceos, quartzo-mica-xistos, um metaconglomerado e um filito, exibindo variações sutis em cor, textura e teor de óxidos de ferro. As quatro amostras de solo (NLSO-2, NLSO-3, NLSO-4 e NLSO-5) apresentam colorações, texturas e graus de alteração compatíveis com a meteorização típica dos campos rupestres.

Tabela 2: Síntese da caracterização macroscópica das amostras.

Amostra	Litologia	Cor Predominante	Textura/Estrutura	Mineralogia Principal	Observações
NLR-01A	Quartzito	Branco amarelado a avermelhado com filmes acinzentados	Fina, estratificada	Quartzo, Óxidos de Ferro	Forte impregnação ferruginosa na superfície exposta
NLR-01B	Quartzito	Branco acinzentado	Fina a média, maciça	Quartzo, Sericita	Padrão mosqueado, com material marrom a ocre em matriz esbranquiçada. Núcleo mais preservado com níveis micáceos alternados; menor oxidação que 01A.
NLR-04	Quartzito micáceo	Cinza-claro a esbranquiçado	Fina, foliada	Quartzo, Sericita	Padrão mosqueado, com grânulos cinza escuro em matriz esbranquiçada/cinza claro
NLR-05	Quartzito micáceo a quartzo-mica xisto	Bege a ocre-amarelado	Fina, foliada	Quartzo, Muscovita	Foliação bem marcada por planos de mica. Oxidação incipiente nos planos de fraqueza.
NLR-06	Quartzito micáceo a quartzo-mica xisto	Cinza	Fina, foliada	Quartzo, Muscovita, Óxidos superficiais	Estrutura similar à NLR-05, porém com menor conteúdo micáceo e coloração cinza preservada (menos oxidada).
NLR-07	Meta-conglomerado	Matriz branca / Clastos cinza	Matriz fina com clastos de seixo a cascalho, maciça	Quartzo, Hematita, Óxidos superficiais	Clastos de quartzo arredondados a subangulosos suportados por matriz quartzosa recristalizada com filmes de hematita
NLR-08	Filito	Bege amarelado	Muito fina, foliada	Sericita/Muscovita, Quartzo,	Foliação penetrativa intensa. Brilho sedoso. Untuoso ao toque

				Óxidos superficiais	
NLSO-02	Solo	Amarelo-ocre	Areno-siltosa	Quartzo, Argilominerais, Goethita	Solo muito intemperizado, baixa coesão. Cor típica de goethita.
NLSO-03	Solo	Cinza-oliváceo	Areno-siltosa com agregados	Argilominerais, Quartzo	Tom mais escuro e agregados compactos.
NLSO-04	Solo	Bege a castanho-claro	Arenosa grossa	Quartzo, Argilominerais subordinados	Textura granular, baixa coesão. Solo esquelético pouco evoluído.
NLSO-05	Solo	Amarelo-acastanhado	Silto-argilosa	Argilominerais, Goethita	Textura mais fina e plástica. Maior grau de pedogênese e hidratação.

## 4.2 CURVAS ESPECTRAIS DAS AMOSTRAS DE ROCHA

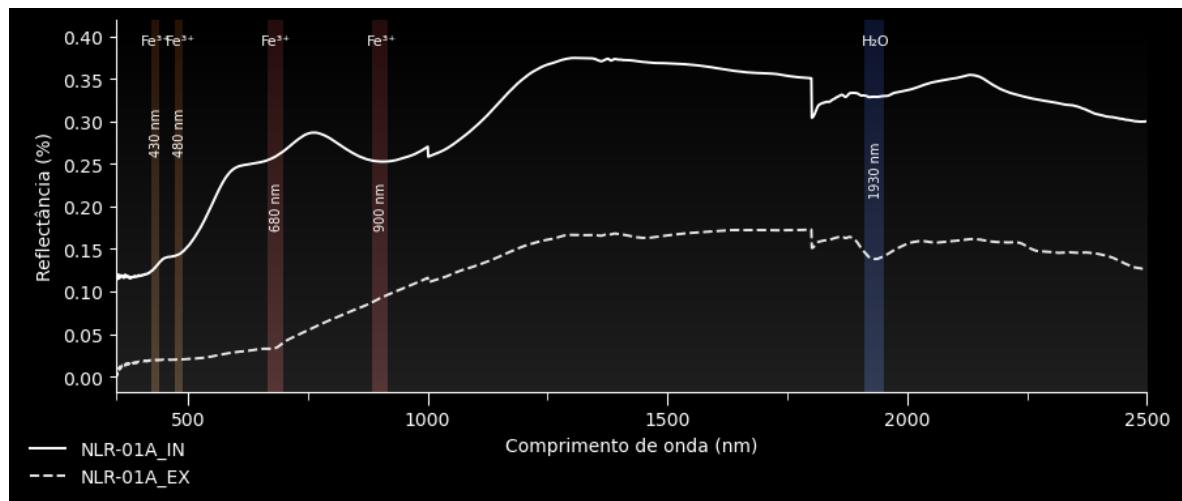
A interpretação espectral de rochas é uma tarefa desafiadora, uma vez que a reflectância registrada por espectrorradiometria resulta da interação entre propriedades mineralógicas e físicas. Pequenas variações na proporção mineral, no tamanho e na forma dos grãos, na rugosidade superficial e no grau de intemperismo podem modificar significativamente a intensidade e a posição das feições de absorção (Meneses; Almeida, 2019). Em rochas dominadas por quartzo, como os quartzitos deste estudo, minerais acessórios, como óxidos e hidróxidos de ferro, muscovita e argilas, exercem papel determinante no comportamento espectral, frequentemente gerando feições amplas e parcialmente sobrepostas. Nesse contexto, as curvas a seguir são apresentadas de forma descriptiva e orientada, com base na identificação das principais feições e em sua associação a constituintes minerais, conforme referências consolidadas, deixando a discussão comparativa e integrada para seção específica. Em todas as figuras de curvas espetrais apresentadas neste capítulo, o eixo x corresponde ao comprimento de onda (nm) e o eixo y à reflectância (%). As curvas foram tratadas por filtragem Savitzky–Golay e remoção do contínuo pelo método convex hull, conforme descrito na seção de Materiais e Métodos.

O espetro da amostra NLR-01A (Figura 8) apresenta reflectância global baixa. A forma geral da curva é controlada pela matriz quartzosa, mineral espectralmente neutro no intervalo analisado sobre a qual se superpõem feições associadas a constituintes acessórios. A reflectância relativamente reduzida pode ser atribuída à maior opacidade e à rugosidade da superfície analisada. No intervalo do visível ao infravermelho próximo, observa-se concavidade ampla entre aproximadamente 700 e 1000 nm, associada a transições eletrônicas do  $\text{Fe}^{3+}$  em óxidos e hidróxidos de ferro. Essa resposta é coerente com o comportamento descrito para minerais férricos, nos quais a queda da reflectância em direção aos menores comprimentos de onda é controlada principalmente por transições de transferência de carga entre oxigênio e ferro ( $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ ), mais intensas que as transições d–d de campo cristalino do  $\text{Fe}^{3+}$  no visível (Meneses; Almeida, 2019). Como consequência, desenvolve-se uma banda de absorção forte e larga centrada entre aproximadamente 850 e 1000 nm, responsável pela concavidade característica nessa região.

A feição mais marcante ocorre em torno de 900 nm, compatível com goethita e

hematita. Entretanto, a ausência de uma absorção bem definida entre 530 e 550 nm, característica da hematita, aliada às feições em 430 e 480, sugerem predominância de goethita na amostra, sem descartar contribuição subordinada de hematita, dada a sobreposição espectral frequente entre essas fases (Sherman; Waite, 1985; Meneses; Almeida, 2019). No infravermelho próximo, destaca-se a absorção em torno de 1900 nm, mais intensa na leitura interna e moderada na externa, segundo a literatura, a presença de uma absorção em torno de 1900 nm indica a ocorrência de água molecular, uma vez que essa feição está associada a modos vibracionais que envolvem o dobramento H–O–H, inexistentes na hidroxila estrutural (Clark *et al.*, 1990). Em situações em que essa absorção ocorre sem o desenvolvimento expressivo da banda em ~1400 nm, como no caso da NLR-01A, a resposta espectral pode ser atribuída à presença de água molecular adsorvida ou interlamelar em baixos teores, cuja expressão espectral é frequentemente mais pronunciada na região de 1900 nm (Hunt, 1977; Clark *et al.*, 1990). A partir de 2200, observa-se uma sensível atenuação no perfil da curva, mas sem absorções específicas.

Figura 8: Espectro de reflectância da amostra NLR-01A, com leituras interna e externa. Destacadas as regiões de absorção associadas ao  $\text{Fe}^{3+}$  (430–480, 680 e 900 nm) e água (1930 nm).



Fonte: Elaborado pelo autor

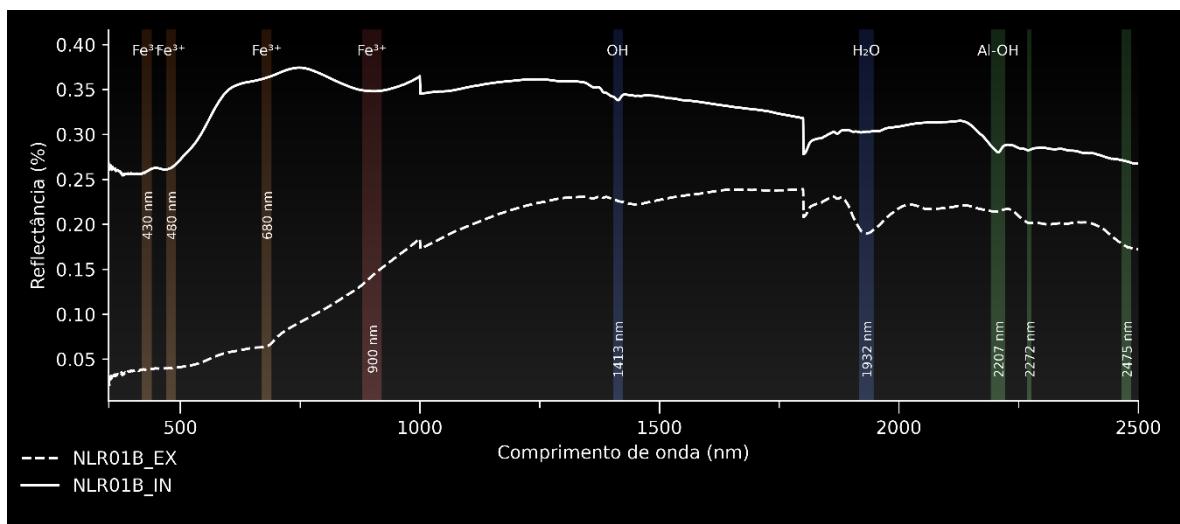
O espectro da amostra NLR-01B (Figura 9) apresenta reflectância global baixa a moderada, com forma geral suavizada pela matriz de quartzo, sobre a qual se superpõem feições associadas a constituintes acessórios. No VNIR, as feições diagnósticas de goethita (430, 480 e 900 nm) observadas na leitura interna apresentam-se fortemente atenuadas na face externa.

No infravermelho próximo e no SWIR, a leitura interna caracteriza-se por uma fraca absorção em 1413 nm (OH estrutural) e uma banda aluminosa centrada em 2207 nm. Nota-se, contudo, a ausência de uma feição desenvolvida de água molecular em 1900 nm.

A ausência da banda em 1900 nm é diagnóstica. Conforme discutido por Clark *et al.* (1990), a hidroxila estrutural não apresenta o modo vibracional de dobramento H–O–H característico da água molecular (responsável pela absorção em 1900 nm). No SWIR, o grupo OH<sup>−</sup> exibe apenas o primeiro *overtone* do estiramento O–H em torno de 1400 nm (uma transição permitida pela anarmonicidade da ligação). Portanto, a presença isolada da banda de 1413 nm indica a ocorrência exclusiva de hidroxila estrutural, compatível com a natureza relativamente anidra da muscovita (Meneses; Almeida, 2019). A banda em 2207 nm, por sua vez, decorre da combinação dos modos de estiramento e deformação da ligação Al–OH, confirmando a mineralogia micácea (Hunt, 1977).

Em contraste, a leitura externa apresenta o enfraquecimento desta banda em 2207 nm e o desenvolvimento de uma absorção moderada de água molecular. Associada ao surgimento de uma feição em torno de 2272 nm, essa assinatura sugere a presença superficial de hidróxidos aluminosos e fases hidratadas, em detrimento da contribuição espectral da fase micácea primária (Hunt, 1971).

Figura 9: Espectro de reflectância da amostra NLR-01B, com leituras interna e externa, destacando feições férreas no VNIR (450–500, 680 e 900 nm), bandas de OH em 1413 nm e de água em 1932 nm, além de absorção aluminosa no SWIR em 2210 nm e feições secundárias em 2272 e 2475 nm.

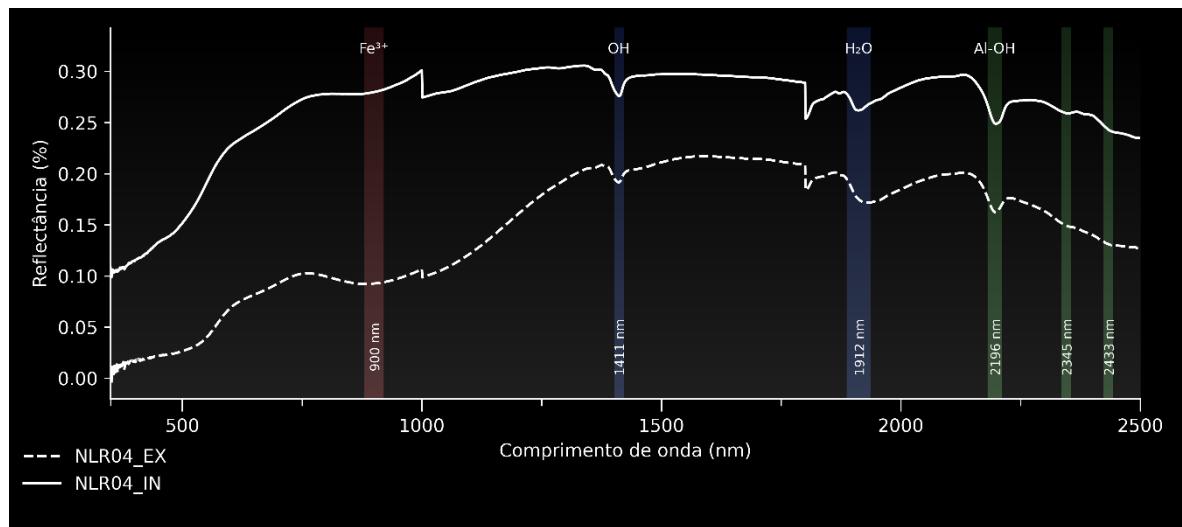


Fonte: Elaborado pelo autor

O espectro da amostra NLR-04 (Figura 10) apresenta reflectância global baixa, com forma geral suavizada controlada pela matriz quartzosa, sobre a qual se superpõem feições associadas a constituintes acessórios. No intervalo do visível ao infravermelho próximo, as feições ferríferas são muito discretas, com um vale fraco em torno de 900 nm, indicando contribuição muito subordinada de goethita.

No infravermelho próximo, observam-se bandas moderadas em torno de 1400 nm e 1915 nm, associadas a grupos OH estruturais e à presença de água molecular (Meneses; Almeida, 2019). No infravermelho de ondas curtas, destaca-se uma banda aluminosa muito intensa centrada em aproximadamente 2200 nm, acompanhada por feições fracas em torno de 2340 nm e por um ombro próximo de 2430 nm, conjunto espectral fortemente indicativo da presença de muscovita.

Figura 10: Espectro de reflectância da amostra NLR 04, com leituras interna e externa, destacando feições em 880, 1400 e 1915 nm, além da banda aluminosa em 2210 nm e absorções discretas entre 2340 e 2430 nm.



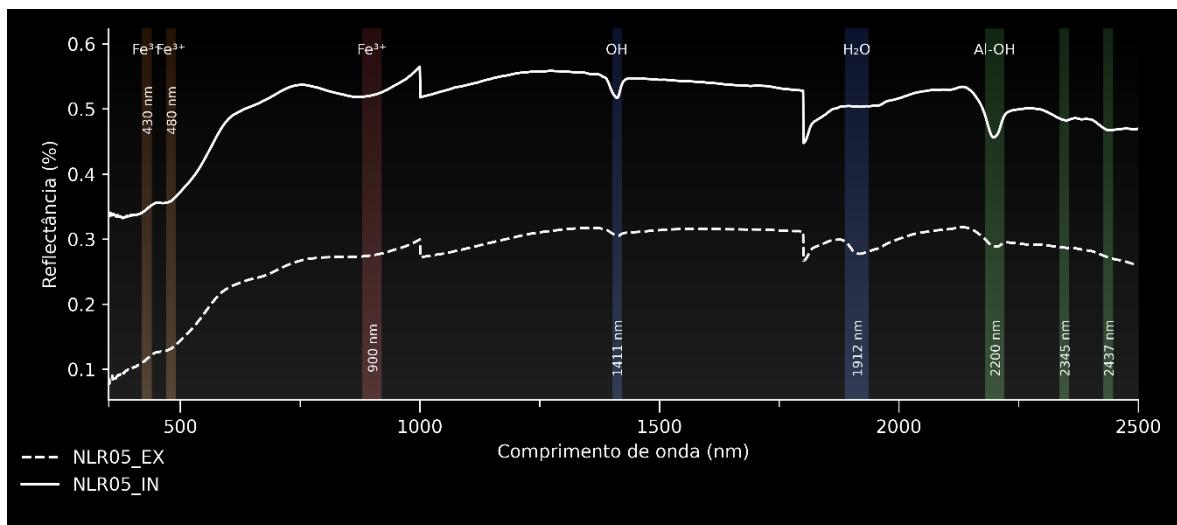
Fonte: Elaborado pelo autor

A amostra NLR-05 diferencia-se das anteriores por apresentar reflectância moderada, apesar de também ser dominada por uma matriz quartzosa, sobre a qual se superpõem feições associadas aos constituintes acessórios. No intervalo do visível ao infravermelho próximo, observam-se feições fracas em torno de 430 e 480 nm, um ombro em aproximadamente 680 nm e um vale moderado próximo de 900 nm, compatíveis com impregnação ferruginosa

subordinada, dominada por goethita.

No infravermelho próximo, a banda em torno de 1400 nm é moderada na leitura interna e fraca na externa, enquanto a absorção de água molecular em aproximadamente 1912 nm é mais expressiva na leitura externa. No infravermelho de ondas curtas, destaca-se uma banda aluminosa bem desenvolvida em torno de 2200 nm, mais expressiva na leitura interna, acompanhada por feições fracas em aproximadamente 2345 e 2437 nm, indicando a participação da muscovita no controle das feições espectrais.

Figura 11: Espectro de reflectância da amostra NLR-05, destacando feições em torno de 430, 480 e 900 nm, bandas em 1411 nm e 1912 nm, além da banda em aproximadamente 2200 nm e absorções discretas entre 2345 e 2437 nm.

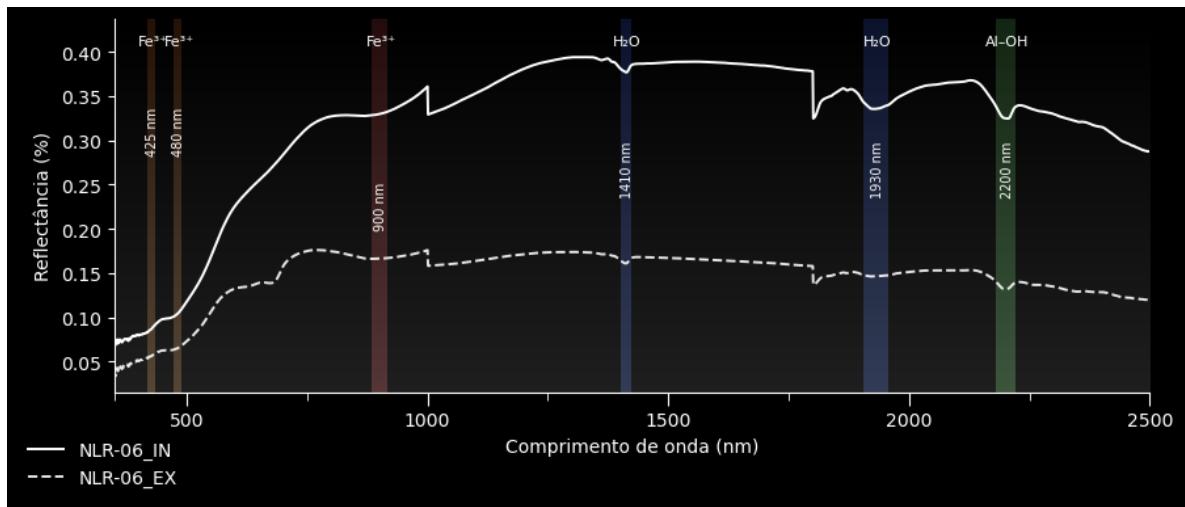


Fonte: Elaborado pelo autor

Na amostra NLR-06, a reflectância global reduzida está associada principalmente à maior rugosidade e opacidade da superfície analisada. No intervalo do visível ao infravermelho próximo, observam-se feições fracas em torno de 425 e 480 nm e um vale moderado próximo de 900 nm, compatíveis com a presença subordinada de goethita.

No infravermelho próximo, a banda em torno de 1400 nm é fraca, enquanto a absorção de água molecular em aproximadamente 1900 nm é moderada na leitura interna e mais intensa na externa, indicando maior hidratação superficial. No infravermelho de ondas curtas, destaca-se uma banda aluminosa desenvolvida em torno de 2200 nm, evidenciando participação de micas aluminosas no controle das feições espectrais, provavelmente associadas à muscovita nesse contexto.

Figura 12: Espectro de reflectância da amostra NLR-06, com leituras interna e externa, destacando feições férricas no VNIR (425–480 e 900 nm), bandas de OH em 1400 nm e de água em 1900 nm, além de absorção aluminosa no SWIR em 2200 nm.

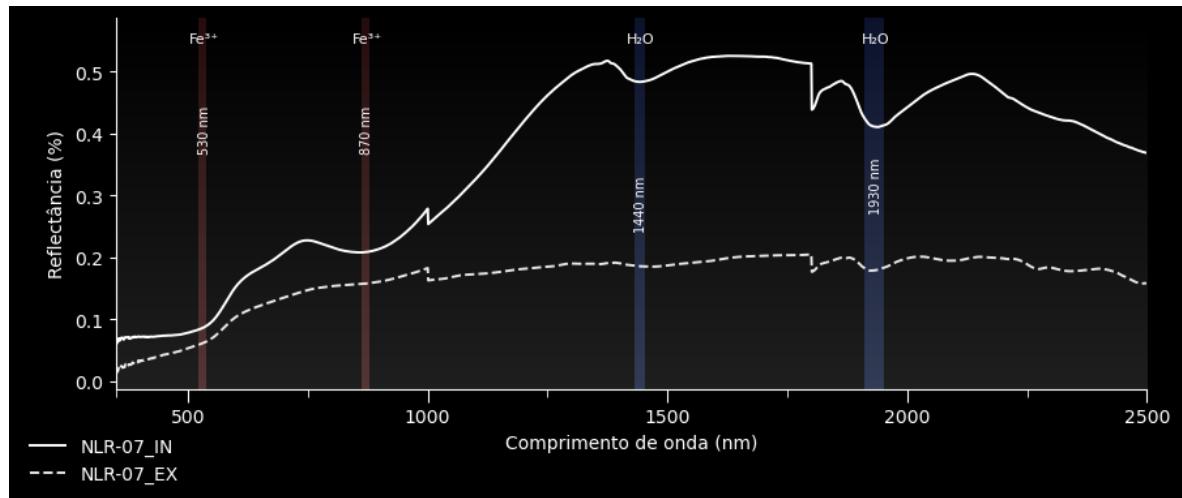


Fonte: Elaborado pelo autor

O espectro da amostra NLR-07 (Figura 13) apresenta reflectância moderada e comportamento espectral marcado por heterogeneidade composicional, refletida tanto na forma geral da curva quanto na distribuição das feições de absorção. Observa-se uma atenuação acentuada da reflectância no intervalo do visível ao infravermelho próximo até aproximadamente 1000 nm, associada à presença de fases férricas. Nesse intervalo, destacam-se uma inflexão em torno de 530 nm e um vale amplo próximo de 870 nm, feições atribuídas principalmente à presença de hematita disseminada (Meneses; Almeida, 2019).

No infravermelho próximo, identifica-se uma banda moderada em torno de 1400 nm na leitura interna e uma absorção de água molecular em aproximadamente 1930 nm, mais intensa na leitura interna e fraca na externa, indicando maior expressão da feição de hidratação nessa leitura. No infravermelho de ondas curtas, observa-se nova atenuação da reflectância a partir de aproximadamente 2200 nm, sem desenvolvimento de bandas diagnósticas bem definidas.

Figura 13: Espectro de reflectância da amostra NLR-07, com leituras interna e externa, destacando inflexão em torno de 530 nm, vale amplo próximo de 870 nm, feições de hidratação em aproximadamente 1400 e 1930 nm.



Fonte: Elaborado pelo autor

O espectro da amostra NLR-08 (Figura 14) apresenta forma geral suavizada e reflectância relativamente estável ao longo do intervalo do visível ao infravermelho próximo, com comportamento pouco estruturado nesse domínio espectral. No VNIR, observam-se feições muito discretas, porém perceptíveis, em torno de 425 e 475 nm, acompanhadas por um ombro em aproximadamente 678 nm e por uma concavidade ampla centrada em torno de 900 nm, compondo um conjunto de feições associado à goethita, que domina essa porção do espectro.

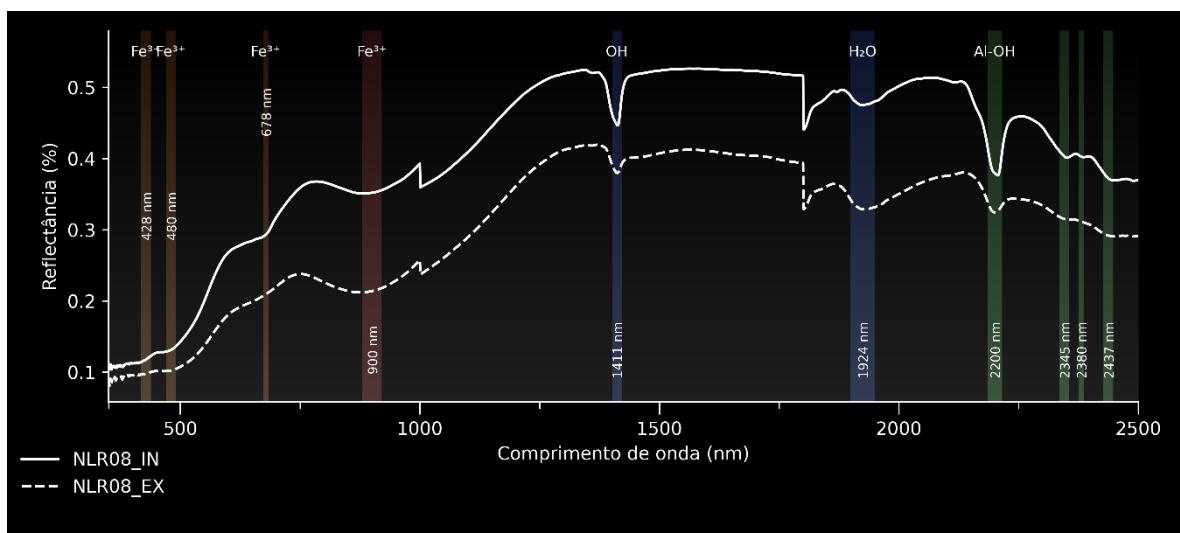
No infravermelho próximo, destaca-se uma absorção intensa associada a grupos hidroxila em aproximadamente 1413 nm, seguida por uma banda de água molecular de intensidade moderada em torno de 1924 nm. No infravermelho de ondas curtas, observa-se uma banda aluminosa bem definida centrada em aproximadamente 2200 nm, acompanhada por absorções adicionais em torno de 2348 nm, além de feições mais discretas em aproximadamente 2380 e 2440 nm. Esse conjunto de absorções no SWIR indica o controle espectral exercido pela muscovita, com contribuição subordinada de argilominerais.

A interpretação espectral de rochas xistosas e filíticas, como a NLR-08, deve considerar a influência da textura e da orientação preferencial dos minerais constituintes sobre a resposta espectral. Conforme discutido por Meneses e Almeida (2019), é possível

que o domínio espectral de um único filossilicato, como a muscovita, oculte ou atenua as feições espetrais de outros minerais, como clorita e biotita, mesmo quando estes ocorrem em proporções mineralógicas semelhantes. Esse comportamento está diretamente relacionado à distribuição e à orientação dos minerais na rocha, sendo fortemente controlado por texturas como lepidoblástica e nematoblástica.

Em rochas com essas texturas, a resposta espectral pode variar de acordo com a área selecionada para a medição e, sobretudo, com a orientação da superfície medida em relação ao plano de foliação. A xistosidade pode, portanto, dificultar a aquisição espectral, resultando em pequenas variações na posição e na intensidade das bandas de absorção, mas sem alterar significativamente o padrão morfológico geral do espectro.

Figura 14: Espectro de reflectância da amostra NLR-08, com leituras interna e externa, destacando feições em 425, 475, 678 e 900 nm, absorção em aproximadamente 1411 nm, banda de água molecular próxima de 1924 nm, vale pronunciado no SWIR em torno de 2200 nm e absorções em 2345 nm, 2380 e 2437 nm.



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.3 COMPARAÇÃO COM A BIBLIOTECA ESPECTRAL DO SGB

Para avaliar a consistência espectral da interpretação mineralógica e a influência do intemperismo, a curva da amostra NLR-04 (leitura interna) foi comparada com o espectro de referência 4320-SJ-R-0296, disponível na biblioteca do Serviço Geológico do Brasil. A Figura 15 apresenta essa comparação, exibindo a amostra deste estudo juntamente com duas leituras distintas da referência: uma realizada na face exposta (superfície intemperizada) e

outra na face serrada (rocha sã).

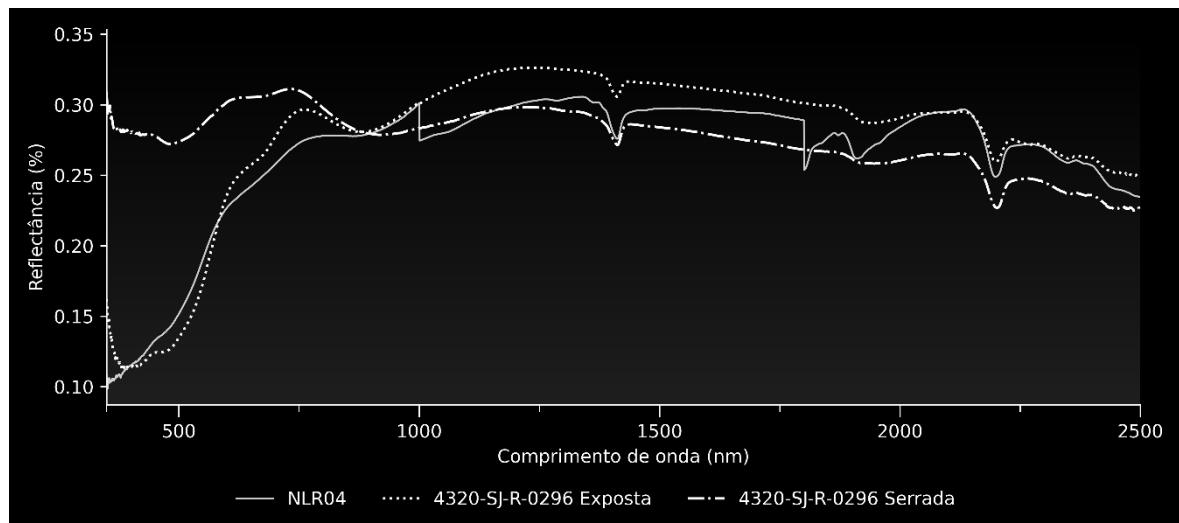
Observa-se elevada convergência espectral entre a amostra NLR-04 e a leitura da face exposta da referência 4320-SJ-R-0296. Ambas as curvas apresentam morfologia semelhante no intervalo do VNIR, caracterizada por uma queda progressiva da reflectância em direção aos menores comprimentos de onda e pela presença de uma concavidade centrada em aproximadamente 900 nm, associada à ocorrência dos óxidos de ferro hematita e goethita. Nota-se que as feições férricas secundárias apresentam maior nitidez na amostra de referência, enquanto a amostra NLR-04 exibe feições de hidratação em torno de 1400 e 1900 nm ligeiramente mais intensas, o que pode estar relacionado a diferenças na rugosidade superficial e no grau de retenção de umidade higroscópica no momento da medição.

A comparação com a leitura da face serrada da referência evidencia aspectos importantes sobre a composição da rocha e o papel da alteração superficial. No VNIR, a face serrada apresenta atenuação significativamente menor e feições férricas mais suaves, indicando que a absorção mais intensa no visível observada nas demais curvas está associada principalmente a filmes de oxidação desenvolvidos na superfície intemperizada.

No intervalo do SWIR, entretanto, as três curvas apresentam morfologia praticamente idêntica, com coincidência na posição e na forma das principais feições de absorção, indicando controle litológico comum. Destaca-se que, na face serrada, não se observa uma banda de absorção bem desenvolvida em torno de 1900 nm, enquanto permanecem preservadas as feições associadas à hidroxila estrutural em aproximadamente 1400 nm e à ligação Al–OH em torno de 2200 nm. Esse comportamento é compatível com a presença dominante de muscovita, mineral que contém hidroxila em sua estrutura cristalina, mas não água molecular, e reforça que as absorções em torno de 1900 nm observadas na amostra NLR-04 e na face exposta da referência estão associadas à presença de água adsorvida ou a fases secundárias relacionadas ao intemperismo.

A comparação entre os espectros obtidos neste estudo e aqueles disponíveis na biblioteca espectral do Serviço Geológico do Brasil foi realizada de forma qualitativa, baseada na inspeção visual da morfologia das curvas e das feições de absorção nos intervalos VNIR e SWIR. Não foram aplicadas métricas quantitativas de similaridade espectral, como ângulo espectral (SAM), correlação ou erro quadrático médio (RMSE), o que constitui uma limitação metodológica desta comparação e uma perspectiva para trabalhos futuros.

Figura 15: Comparação entre o espectro de reflectância da amostra NLR-04 e o espectro de referência 4320-SJ-R-0296 da biblioteca do Serviço Geológico do Brasil, incluindo leituras realizadas na face exposta (superfície intemperizada) e na face serrada (rocha sã).



Fonte: Biblioteca espectral do SGB. Elaborado pelo autor

Adicionalmente, buscou-se validar a assinatura espectral da amostra NLR-08, classificada macroscopicamente como sericitafilito. Para tal, realizou-se a comparação com a amostra de referência 4320-MF-R-0248, descrita como Quartzo-Mica-Xisto na biblioteca do Serviço Geológico do Brasil, utilizando duas leituras: uma em superfície de quebra natural (QN) e outra em face exposta (Figura 16).

A escolha de uma referência litologicamente distinta, porém de mesma gênese metapelítica, permite avaliar a consistência da resposta espectral associada à assembleia mineralógica micácea comum a ambas. Ressalta-se ainda que as duas amostras pertencem à Formação Casa Forte e foram coletadas na mesma área, reforçando a pertinência da comparação espectral.

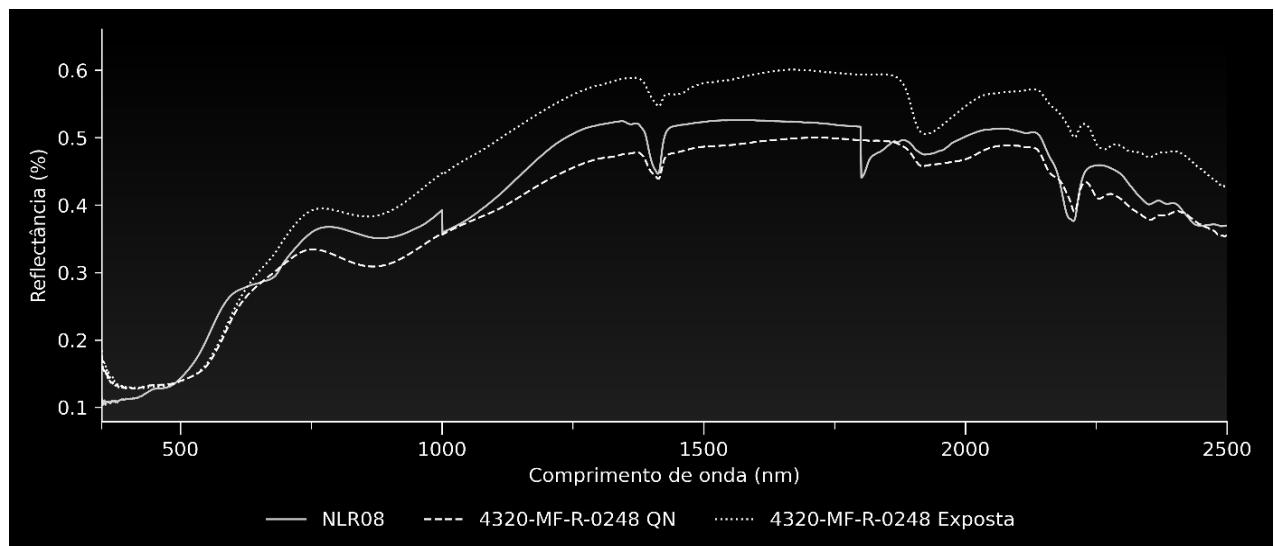
No intervalo do visível ao infravermelho próximo (VNIR), as três curvas apresentam elevada sobreposição geométrica, com diferenças sutis na posição e na intensidade das feições associadas às fases férricas. As leituras do SGB exibem inflexão da curva próxima a 530 nm e uma feição de absorção centrada em aproximadamente 878 nm, compatíveis com maior participação de hematita. Em contraste, a amostra NLR-08 apresenta inflexão deslocada para cerca de 485 nm e uma concavidade centrada em torno de 900 nm. Associada

à presença de um ombro relativamente mais evidente em aproximadamente 678 nm na amostra NLR-08, esse conjunto espectral sugere que, embora ambas contenham misturas de óxidos, a amostra deste estudo possui um domínio espectral mais expressivo de goethita, enquanto a referência tende à hematita.

No infravermelho próximo (NIR), destaca-se a absorção associada à hidroxila estrutural em torno de 1400 nm, significativamente mais intensa na amostra NLR-08 em comparação às leituras do SGB, refletindo a forte participação de minerais micáceos. Em relação à banda de água molecular em aproximadamente 1900 nm, a amostra NLR-08 apresenta comportamento semelhante à leitura em superfície de quebra natural da referência, ambas com absorção pouco desenvolvida, distinguindo-se da leitura em face exposta, que exibe hidratação mais intensa. Esse padrão indica que a matriz micácea da NLR-08 preserva características de baixa hidratação molecular, comparáveis às observadas em superfícies de rocha menos alteradas.

No infravermelho de ondas curtas (SWIR), observa-se coincidência na posição da principal banda de absorção em torno de 2200 nm, associada às ligações Al OH, confirmando a presença de muscovita/sericita como constituinte dominante em ambas as rochas. Nota-se, contudo, que a amostra NLR-08 apresenta um perfil espectral mais simplificado, não exibindo as feições secundárias em 2254 nm e 2312 nm observadas no xisto de referência. Essa diferença pode refletir variações na mineralogia acessória, na cristalinidade ou no grau metamórfico entre o filito analisado e o xisto do SGB.

Figura 16: Comparação entre o espectro de reflectância da amostra NLR-08 e o espectro de referência 4320-MF-R-0248, descrito como Quartzo-Mica-Xisto na biblioteca do Serviço Geológico do Brasil. São apresentadas duas leituras da amostra de referência, correspondentes à superfície de quebra natural (QN) e à face exposta.



Fonte: Biblioteca espectral do SGB. Elaborado pelo autor

#### 4.4 ANÁLISE DAS CURVAS ESPECTRAIS DAS AMOSTRAS DE SOLO

Os solos tropicais caracterizam-se por elevado grau de intemperismo químico, resultado de condições climáticas quentes e úmidas que favorecem a lixiviação de sílica e bases e a concentração relativa de minerais estáveis em ambiente superficial. Como consequência, a fração argila desses solos é dominada principalmente por caulinita e gibbsita, associadas a óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, enquanto o quartzo tende a concentrar-se nas frações silte e areia (Baptista, 2006; Meneses; Almeida, 2019).

Do ponto de vista espectral, os argilominerais mais comuns em solos tropicais apresentam feições diagnósticas bem definidas no infravermelho próximo e no infravermelho de ondas curtas, associadas principalmente às vibrações moleculares de grupos hidroxila e à presença de água estrutural ou adsorvida. As absorções em torno de 1400 nm estão relacionadas a ligações Al–OH e H–OH, as feições próximas a 1900 nm indicam água molecular, enquanto as absorções centradas entre aproximadamente 2160 e 2230 nm são atribuídas às ligações Al–OH típicas de argilominerais, como a caulinita, a ilita e a montmorillonita (Meneses; Almeida, 2019; Baptista; Madeira Netto; Souza, 2019).

Além dos argilominerais, os óxidos de ferro exercem papel importante no controle do comportamento espectral dos solos, especialmente na região do visível e do VNIR. A goethita e a hematita são os minerais férricos mais frequentes, produzidos pela oxidação do ferro liberado durante o intemperismo dos minerais primários. Como citado anteriormente, esses minerais apresentam absorções características em torno de 480 nm, 530 nm e próximo a 900 nm (Sherman; Waite, 1985; Meneses; Almeida, 2019).

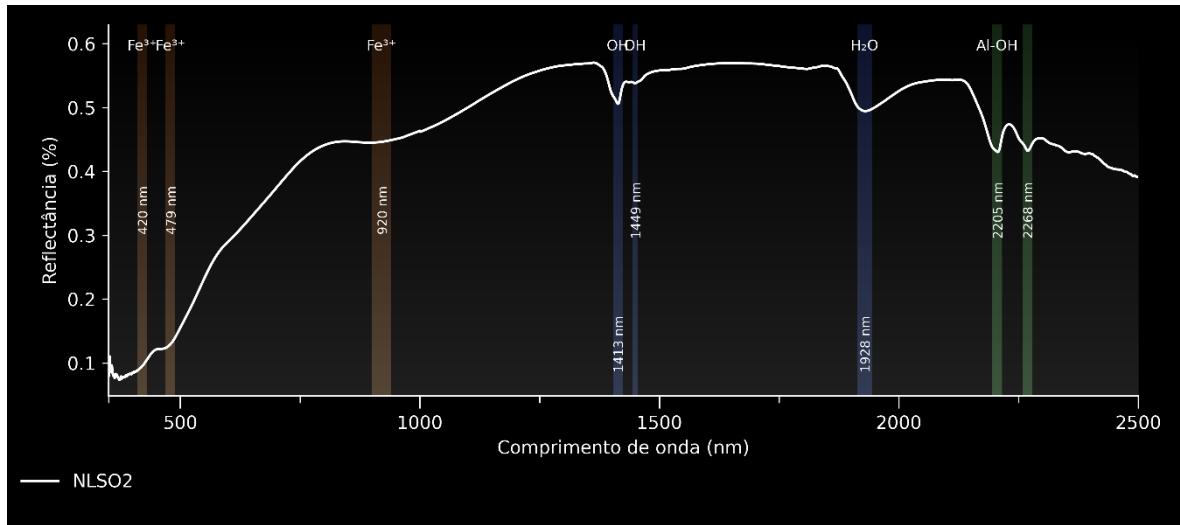
A interpretação espectral de solos, entretanto, é intrinsecamente mais complexa do que a de rochas, devido à influência combinada da textura, da umidade, da matéria orgânica e do grau de alteração pedogenética. A presença de matéria orgânica e de minerais opacos tende a reduzir o albedo e a atenuar ou esconder feições espectrais específicas, enquanto a umidade intensifica as absorções relacionadas à água, sobretudo na região de 1900 nm (Baptista; Madeira Netto; Souza, 2019). Além disso, em solos fortemente intemperizados, a transformação quase completa dos minerais primários dificulta a correlação direta entre a assinatura espectral do solo e a litologia da rocha de origem.

Nesse contexto, o espectro de reflectância da amostra NLSO-02 (Figura 17) apresenta feições de absorção bem definidas. No intervalo do visível ao infravermelho próximo (VNIR), a curva exibe absorções discretas em torno de 422 e 479 nm, associadas a uma concavidade rasa centrada em aproximadamente 920 nm, conjunto diagnóstico da presença de goethita.

No infravermelho de ondas curtas (SWIR), o comportamento espectral torna-se mais complexo, refletindo a contribuição da fração argilosa. Na região próxima de 1400 nm, observa-se uma absorção bem definida em 1413 nm, acompanhada por um ombro em aproximadamente 1449 nm, além de uma banda larga centrada em torno de 1928 nm, relacionada à presença de água molecular.

A banda aluminosa principal ocorre de forma assimétrica em torno de 2205 nm e, adicionalmente, identifica-se uma feição diagnóstica distinta em aproximadamente 2268 nm, atribuída às vibrações envolvendo ligações Al–OH na gibbsita, conforme descrito por Hunt (1971). Esse conjunto de feições é compatível com uma associação mineralógica dominada por caulinita, com contribuição subordinada de gibbsita, de acordo com os padrões espetrais apresentados por Madeira Netto (1996).

Figura 17: Espectro de reflectância do solo NLSO-02, destacando feições em torno de 422 e 479 nm, concavidade suave próxima de 900 nm, absorções em aproximadamente 1400 e 1900 nm, além de vales no SWIR centrados em torno de 2204 e 2268 nm.

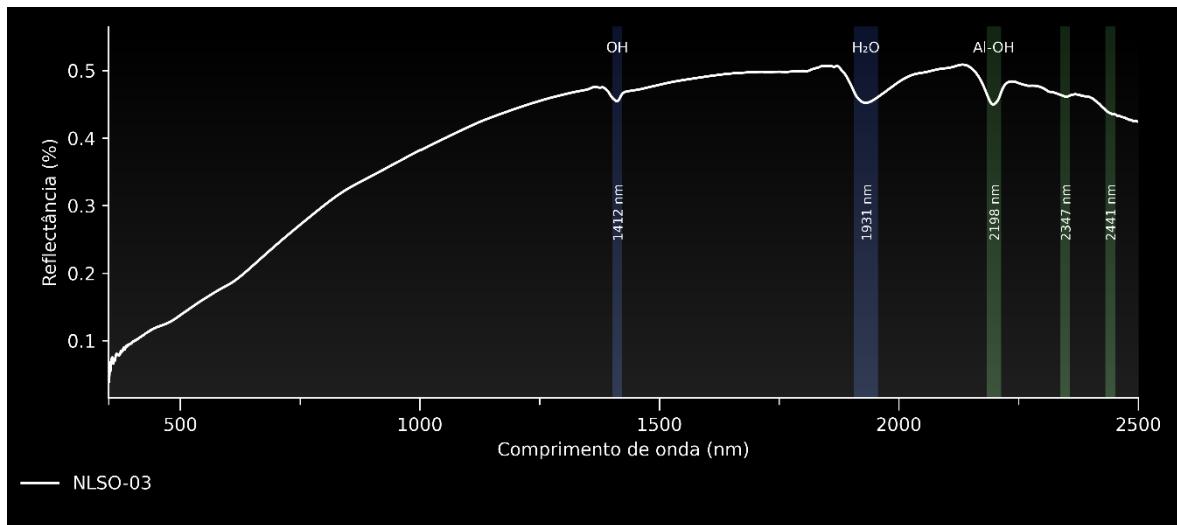


Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento espectral da amostra NLSO-03 (Figura 18) é caracterizado por um conjunto moderado e bem definido de feições de absorção. Primeiro, nota-se a ausência total de absorções no VNIR, com um perfil ascendente até a região do SWIR, em que se observa uma feição de baixa intensidade centrada em 1412 nm. Em 1931 nm, a curva apresenta uma banda de absorção larga e de profundidade moderada, referente à água molecular.

O intervalo entre 2100 e 2500 nm exibe a feição principal de absorção em 2198 nm (Al-OH), de intensidade moderada. Esta banda encontra-se associada a duas absorções secundárias mais fracas, posicionadas em 2347 nm e 2441 nm. A ocorrência simultânea da banda principal em 2198 nm com as feições diagnósticas em 2347 nm e 2441 nm permite identificar a ilita como um dos constituintes mineralógicos da amostra.

Figura 18: Espectro de reflectância do solo NLSO-03, destacando absorções em torno de 1400 e 1900 nm, além de um vale amplo e bem definido centrado em aproximadamente 2200 nm, com feições secundárias no SWIR entre cerca de 2347 e 2441 nm.



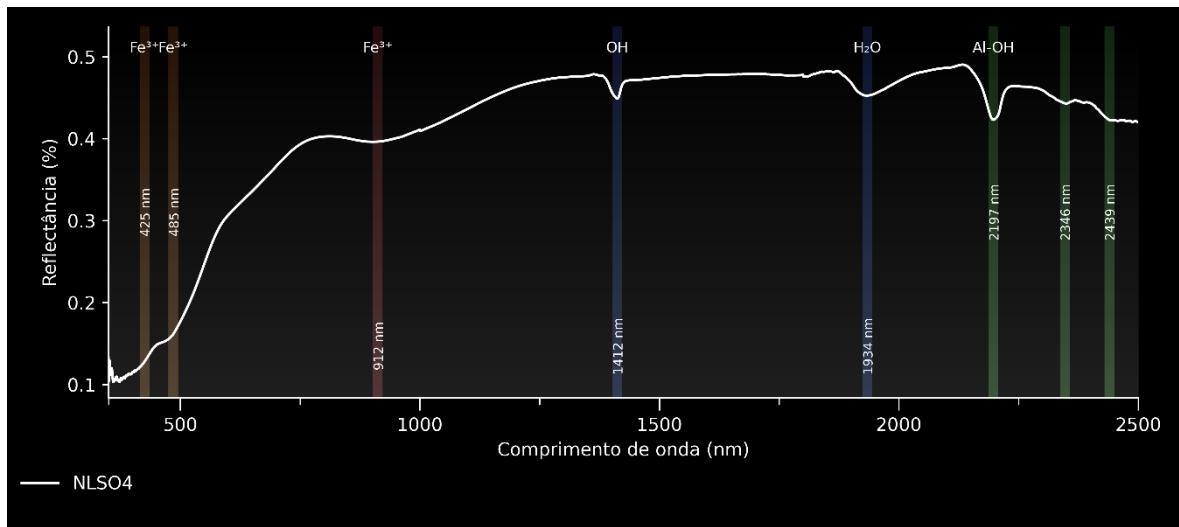
Fonte: Elaborado pelo autor

A análise espectral da amostra NLSO-04 (Figura 19) evidencia a presença simultânea de óxidos de ferro e filossilicatos, que exercem controle sobre o comportamento espectral da curva. No intervalo do visível ao infravermelho próximo, observam-se feições de absorção de baixa intensidade em torno de 425 nm e 485 nm, associadas a uma concavidade rasa centrada em aproximadamente 912 nm. Esse conjunto de feições indica a participação de óxidos e hidróxidos de ferro, sendo compatível com a presença de goethita em proporção subordinada.

No infravermelho próximo, a curva exibe uma banda associada à hidroxila estrutural em aproximadamente 1412 nm, bem individualizada porém de baixa intensidade, acompanhada por uma feição larga e pouco profunda de água molecular em torno de 1934 nm, refletindo a hidratação da mineralogia presente.

No infravermelho de ondas curtas (SWIR), destaca-se uma feição de absorção moderada centrada em aproximadamente 2197 nm, associada às ligações Al-OH, acompanhada por absorções secundárias de intensidade muito fraca em torno de 2346 nm e 2439 nm. A configuração dessas feições é compatível com a presença de ilita como filossilicato predominante, em associação com a fase férrica identificada no VNIR.

Figura 19: Espectro de reflectância do solo NLSO-04, destacando feições em torno de 425 e 485 nm, concavidade suave próxima de 912 nm, absorções em aproximadamente 1412 e 1930 nm, além de um vale no SWIR centrado em torno de 2197 nm e feições secundárias entre cerca de 2346 e 2439 nm.

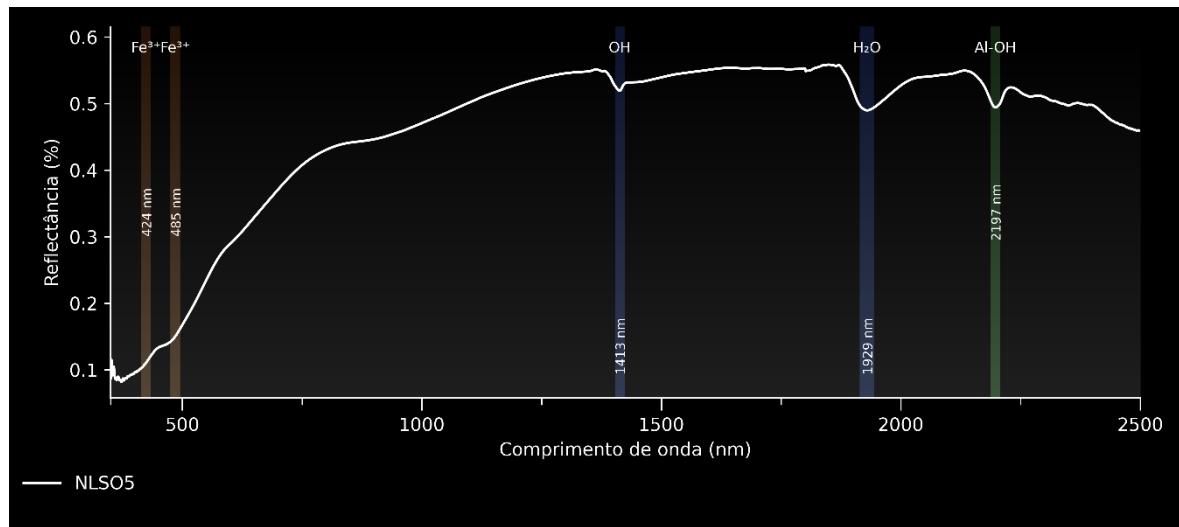


Fonte: Elaborado pelo autor

O espectro de reflectância da amostra NLSO-05 apresenta, no intervalo do visível, feições de absorção discretas em torno de 424 nm e 485 nm, compatíveis com a participação de goethita como fase férrica subordinada. No infravermelho próximo, a curva exibe uma absorção fraca associada à hidroxila estrutural em aproximadamente 1413 nm, acompanhada por uma banda de água molecular em torno de 1929 nm, larga e de profundidade moderada, refletindo a hidratação da mineralogia presente.

No infravermelho de ondas curtas, destaca-se uma feição de absorção centrada em aproximadamente 2197 nm, associada às ligações Al–OH. A região espectral entre 2200 e 2400 nm não apresenta bandas secundárias bem definidas, exibindo apenas feições de magnitude muito reduzida. Esse conjunto de características espectrais indica o domínio de filossilicatos aluminosos, cuja identificação específica é limitada pela ausência de feições secundárias diagnósticas.

Figura 20 Espectro de reflectância da amostra de solo NLSO-05, destacando feições em 425 e 475 nm e concavidade próxima de 900 nm, além das bandas de hidratação em 1410 e 1930 nm e da absorção aluminosa centrada em 2200 nm.



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.5 RESULTADOS DA QUÍMICA POR FRX

A composição química das amostras foi determinada por fluorescência de raios X (FRX). Os resultados, expressos em porcentagem de óxidos, são apresentados na Tabela 2. Ressalta-se que, devido à natureza da análise em amostras de rocha total e solo sem fusão prévia, os totais analíticos podem apresentar variações decorrentes de efeitos de matriz e da presença de elementos leves ou voláteis não quantificados pelo equipamento.

Tabela 3: Composição química das amostras de rocha e solo expressa em óxidos maiores (%).

Amostra	Material	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	MnO (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Total (%)
NLR-01A	Quartzito	63,96	5,74	13,62	0,24	0,02	0,08	n.d.	n.d.	0,24	0,15	84,06
NLR-01B	Quartzito	54,84	10,84	4,44	0,43	0,01	0,07	0,4	n.d.	0,29	0,18	71,51
NLR-04	Quartzito Micáceo	53,91	21,49	6,49	0,44	0,01	0,1	0,51	n.d.	2,11	0,18	85,24
NLR-05	Qtz Micáceo / Qtz-mica-xisto	62,93	31,52	7,69	0,25	0,01	0,03	0,77	n.d.	3,67	0,13	107,01
NLR-06	Qtz Micáceo / Qtz-mica-xisto	62,21	24,11	8,93	0,49	0,04	0,05	0,78	n.d.	2,48	0,31	99,4
NLR-07	Metaconglomerado	72,81	15,14	6,4	0,12	0,02	0,11	2,08	n.d.	0,19	0,15	97,03
NLR-08	Filito	62,58	36,32	10,86	0,6	0,01	n.d.	1,45	n.d.	4,79	0,02	116,62
NLSO-02	Solo	32,09	9,76	2,47	0,52	0	0,01	n.d.	n.d.	1,58	0,08	46,51
NLSO-03	Solo	36,71	7,89	0,97	0,3	n.d.	0,01	n.d.	n.d.	1,43	0,08	47,39
NLSO-04	Solo	44,16	8,59	8,24	0,44	0,06	0,02	n.d.	n.d.	2,64	0,16	64,31
NLSO-05	Solo	40,92	6,08	1,64	0,21	0	0,01	n.d.	n.d.	1,2	0,09	50,16

Nas amostras de rocha, o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) apresenta-se invariavelmente como o constituinte dominante. A amostra NLR-07, classificada como meta-conglomerado, exibe o maior teor relativo de sílica (72,81%) e as menores concentrações de óxidos acessórios, como  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{TiO}_2$ .

Variações significativas são observadas nos teores de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) nas demais amostras. Os quartzitos micáceos NLR-04, NLR-05 e NLR-06 e, de forma mais expressiva, o filito NLR-08 apresentam enriquecimento desses óxidos. Na amostra NLR-08, o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  atinge 36,32%, acompanhado pelo maior valor de  $\text{K}_2\text{O}$  da série (4,79%), indicando quimicamente o predomínio de filossilicatos aluminosos, como muscovita ou sericita, em relação à fração quartzosa.

O óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) exibe distribuição heterogênea, controlada principalmente pelo grau de alteração superficial. Destaca-se a disparidade entre as subamostras de quartzito NLR-01A e NLR-01B. A primeira apresenta teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  superior a 13%, enquanto a segunda registra valores em torno de 4,4%, evidenciando a concentração diferencial de óxidos de ferro em porções distintas de um mesmo afloramento.

Em relação às amostras de solo, NLSO-02 a NLSO-05, os dados revelam uma distinção geoquímica clara em comparação ao substrato rochoso. Observa-se uma redução sistemática nos teores percentuais de  $\text{SiO}_2$ , que variam entre 32% e 44%. Adicionalmente, esse grupo caracteriza-se por totais analíticos significativamente mais baixos, entre aproximadamente 46% e 64%. Esse comportamento é esperado em materiais pedológicos e está associado à elevada proporção de componentes voláteis, como água higroscópica, água estrutural de argilominerais e matéria orgânica, além de elementos leves que não são quantificados pela técnica de fluorescência de raios X.

## 5 DISCUSSÃO

A integração dos dados macroscópicos, espectrais e geoquímicos permitiu estabelecer correlações consistentes entre a composição mineralógica, as propriedades físico-químicas e a resposta espectral das amostras analisadas. A abordagem multi-analítica evidencia que as variações observadas nas curvas de reflectância refletem controles litológicos, condições de superfície e o grau de evolução intempérica e pedogenética dos materiais, expressos principalmente pelas feições do VNIR associadas a  $\text{Fe}^{3+}$  e pelas bandas do SWIR relacionadas a grupos OH e ligações Al–OH.

### 5.1 CONTROLE LITOLÓGICO NA RESPOSTA ESPECTRAL

Observa-se convergência clara entre a classificação macroscópica, os teores de óxidos maiores obtidos por FRX e a expressão das feições de absorção no infravermelho de ondas curtas. As amostras interpretadas como quartzitos micáceos e litotipos metapelíticos, em especial NLR-05, NLR-06 e NLR-08, concentram os maiores teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{K}_2\text{O}$  da série. A amostra NLR-05 apresenta 31,52% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 3,67% de  $\text{K}_2\text{O}$ , a NLR-06 registra 24,11% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 2,48% de  $\text{K}_2\text{O}$ , enquanto a NLR-08 atinge 36,32% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 4,79% de  $\text{K}_2\text{O}$ . Esses valores corroboram a interpretação das bandas centradas em torno de 2200 nm como diagnósticas de filossilicatos aluminosos, particularmente muscovita ou sericita, frequentemente acompanhadas por feições secundárias no intervalo entre aproximadamente 2300 e 2450 nm.

Destaca-se o caso da amostra NLR-08, descrita macroscopicamente como filito, com brilho sedoso e tato untuoso. Essa textura, coerente com elevada proporção de minerais lamelares, corresponde ao máximo teor de alumina da série e à banda aluminosa melhor desenvolvida no SWIR. Esse conjunto confirma que a resposta espectral nessa região constitui um indicador confiável da abundância relativa de filossilicatos na rocha, permitindo distinguir, de forma eficaz, quartzitos relativamente puros de litotipos metapelíticos, mesmo na ausência de análises petrográficas detalhadas, desde que o estado superficial e a textura sejam considerados.

Em contraste, o meta-conglomerado NLR-07 representa o polo quartzoso do conjunto, com teor de  $\text{SiO}_2$  de 72,81% e baixos valores de óxidos associados a minerais acessórios, como  $\text{K}_2\text{O}$ , que atinge apenas 0,19%. Essa composição é compatível com um

arcabouço dominado por clastos de quartzo e inexistência de matriz micácea, o que se reflete na ausência das feições de Al–OH no SWIR. Além disso, a granulometria mais grossa e a heterogeneidade textural contribuem para a redução da continuidade de fases absorventes na superfície medida, resultando em espectros menos estruturados nessa região espectral.

### 5.2 A ASSINATURA DO INTEMPERISMO FÉRRICO

A comparação entre as subamostras NLR-01A e NLR-01B constitui um exemplo claro da influência da alteração superficial na resposta espectral. A subamostra NLR-01A, de coloração mais intensa e aspecto ferruginoso, apresenta teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de 13,62%, enquanto a NLR-01B registra apenas 4,44%. Essa diferença geoquímica manifesta-se de forma direta no VNIR, por meio da intensificação da concavidade ampla associada a  $\text{Fe}^{3+}$  e do desenvolvimento mais pronunciado do vale centrado próximo de 900 nm.

A ausência de uma feição bem definida entre 530 e 550 nm indica que a goethita domina a resposta espectral férrica, embora a contribuição subordinada de hematita não possa ser descartada, dada a sobreposição espectral frequente entre essas fases. Esse comportamento demonstra que a spectrorradiometria de reflectância é sensível não apenas à presença, mas também ao aumento relativo de óxidos e hidróxidos de ferro na superfície analisada, corroborando as observações macroscópicas de coloração e impregnação ferruginosa realizadas em campo.

A coexistência de assinaturas de goethita e hematita em materiais mais enriquecidos em ferro é compatível com ambientes de alteração complexos, nos quais diferentes condições redox e de hidratação podem coexistir em microescala. Teores elevados de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e indícios de hematita em níveis mais cimentados podem estar associados a estágios mais avançados de ferruginização, embora a distinção entre processos intempéricos atuais e possíveis heranças de superfícies mais antigas exija informações adicionais de contexto geomorfológico e estratigráfico.

### 5.3 EVOLUÇÃO PEDOGENÉTICA E RELAÇÃO SOLO-ROCHA

A transição do substrato rochoso para os horizontes de solo é marcada por processos de alteração química, hidratação e neoformação de minerais secundários, capturados de forma complementar pelos dados geoquímicos e espetrais. Nos solos analisados, observa-

se redução sistemática dos teores relativos de SiO<sub>2</sub> em comparação às rochas, variando entre 32,09% na amostra NLSO-02 e 44,16% na NLSO-04. Esse padrão reflete a transformação de silicatos primários e o enriquecimento relativo de fases mais estáveis em ambiente superficial, como argilominerais e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Um aspecto relevante é a ocorrência de totais analíticos mais baixos no FRX para as amostras de solo, que variam de 46,51% a 64,31%. Esse comportamento é característico de materiais pedológicos e está associado à presença de componentes não quantificados pela técnica, como água higroscópica, água estrutural em argilominerais e matéria orgânica. A resposta espectral confirma essa interpretação ao registrar bandas de hidratação em torno de 1400 nm e 1900 nm significativamente mais intensas do que aquelas observadas nas rochas, indicando maior conteúdo de hidroxilas estruturais e água molecular.

Do ponto de vista mineralógico, os solos exibem domínio de fases aluminosas no SWIR, com banda principal centrada em torno de 2200 nm. Na amostra NLSO-02, a presença adicional de uma feição em torno de 2268 nm indica contribuição de gibbsita em associação com caulinita. Nas amostras NLSO-03 e NLSO-04, a banda aluminosa acompanhada por feições secundárias em torno de 2347 e 2441 nm sustenta a presença de ilita como um dos constituintes mineralógicos, indicando que, apesar do intemperismo, determinadas assinaturas de filossilicatos podem ser preservadas. Já a amostra NLSO-05 apresenta banda aluminosa sem feições secundárias bem definidas, limitando a identificação específica do filossilicato dominante e indicando apenas o domínio de fases aluminosas.

Quanto à herança litológica, a recorrência de assinaturas micáceas nas rochas e a presença de feições compatíveis com filossilicatos aluminosos nos solos sugerem que parte da mineralogia pedogenética reflete, em escala local, a composição do substrato. Ainda assim, essa relação deve ser interpretada com cautela, considerando que solos em ambientes tropicais podem registrar mistura de materiais, retrabalhamento superficial e processos pedogenéticos que tendem a convergir para assembleias mineralógicas semelhantes em estágios avançados de intemperismo.

#### 5.4 SÍNTSE DA DISCUSSÃO E IMPLICAÇÕES PARA A BIBLIOTECA ESPECTRAL

A integração entre caracterização macroscópica, espectroscopia de reflectância e dados geoquímicos por FRX demonstra que a resposta espectral das rochas e solos dos campos rupestres quartzíticos da região de Rio Acima é fortemente controlada pela mineralogia acessória, pelo grau de intemperismo e pelas condições de superfície, mais do que pela matriz quartzosa em si.

Nas rochas, a presença e a abundância relativa de filossilicatos aluminosos são refletidas de maneira consistente pela banda aluminosa em torno de 2200 nm e por feições secundárias no SWIR, em concordância direta com os teores elevados de  $Al_2O_3$  e  $K_2O$ . De modo complementar, a intensidade das feições férricas no VNIR acompanha o enriquecimento em  $Fe_2O_3$ , como evidenciado pelas diferenças entre as subamostras NLR-01A e NLR-01B. Esses resultados confirmam que a espectroscopia de reflectância responde de forma sensível às variações litogegeoquímicas, mesmo em litotipos visualmente semelhantes.

A comparação com espectros de referência da biblioteca do Serviço Geológico do Brasil reforça essas interpretações ao evidenciar que, no SWIR, a morfologia espectral permanece controlada pela mineralogia primária, independentemente do grau de alteração superficial. A posição da banda aluminosa em torno de 2200 nm mostra-se um marcador robusto da presença de micas, enquanto variações nas feições secundárias refletem diferenças na mineralogia acessória, na textura e no grau metamórfico das rochas.

Nos solos, a convergência espectral observada, caracterizada por bandas intensas de hidratação em torno de 1400 e 1900 nm e pelo domínio de feições aluminosas no SWIR, reflete o grau de intemperismo pedogenético típico dos campos rupestres quartzíticos. Embora a espectroscopia permita reconhecer associações mineralógicas dominantes, a identificação específica de argilominerais em solos intemperizados apresenta limitações inerentes ao próprio sistema pedogenético.

Embora as relações entre a resposta espectral e a composição geoquímica tenham sido discutidas de forma consistente ao longo deste trabalho, como a associação entre a banda aluminosa em torno de 2200 nm e os teores de  $Al_2O_3$  e  $K_2O$ , bem como entre as feições férricas no VNIR e o enriquecimento em  $Fe_2O_3$ , essas relações foram avaliadas

predominantemente de maneira qualitativa. A aplicação de abordagens quantitativas, como a correlação entre a profundidade ou posição de bandas de absorção e os teores de óxidos, constitui uma perspectiva para trabalhos futuros, podendo contribuir para a formalização estatística das interpretações aqui apresentadas.

Em conjunto, os resultados permitem discutir de forma integrada os controles litológicos, intempéricos e pedogenéticos sobre a resposta espectral das rochas e solos analisados. A comparação entre dados espetrais, geoquímicos e macroscópicos evidencia a importância da mineralogia acessória e do estado superficial na interpretação das curvas de reflectância, ao mesmo tempo em que explicita as limitações inerentes à identificação mineralógica em ambientes fortemente intemperizados, como os campos rupestres quartzíticos do Quadrilátero Ferrífero.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho realizou a caracterização espectral de rochas e solos associados a ambientes de campo rupestre quartzítico na região de Rio Acima, Quadrilátero Ferrífero, por meio da integração entre observações macroscópicas, espectroscopia de reflectância e análises geoquímicas por fluorescência de raios X.

Os resultados obtidos indicam que a resposta espectral desses materiais é controlada principalmente pela mineralogia acessória e pelo grau de intemperismo, enquanto a matriz quartzosa exerce papel secundário no desenvolvimento das feições diagnósticas. A presença de filossilicatos aluminosos e de óxidos e hidróxidos de ferro mostrou-se determinante para a diferenciação espectral entre litotipos e materiais pedogenéticos.

A comparação entre rochas e solos evidenciou que o avanço do intemperismo está associado à intensificação das feições de hidratação e à simplificação da resposta espectral, o que impõe limitações à identificação mineralógica específica em solos fortemente intemperizados. Ainda assim, foi possível reconhecer associações mineralógicas dominantes e estabelecer relações consistentes entre espectroscopia, geoquímica e caracterização de campo.

De modo geral, o estudo confirma o potencial da espectroscopia de reflectância como ferramenta complementar para a caracterização mineralógica de ambientes quartzíticos de campo rupestre, desde que aplicada de forma integrada a outros métodos e com atenção às limitações impostas pelo intemperismo e pelas condições de superfície. O desenvolvimento e a aplicação do software Hemera mostraram-se eficazes para o processamento dos dados, permitindo a aplicação de rotinas como a remoção do contínuo (convex hull) e a identificação consistente das feições de absorção.

A biblioteca espectral gerada constitui um registro de referência para investigações futuras em contextos geológicos semelhantes, oferecendo subsídios para ações de mapeamento geológico, prospecção mineral e monitoramento ambiental. Como perspectiva de aplicação, essa biblioteca pode subsidiar futuras iniciativas de integração com dados de sensoriamento remoto, especialmente de sensores com cobertura no VNIR–SWIR, como o *Sentinel-2* e sensores hiperespectrais, a exemplo do *PRISMA* e do *EnMAP*.

## REFERÊNCIAS

- ABWENY, M. S. *et al.* *Short-wavelength infrared (SWIR) spectroscopy of low-grade metamorphic volcanic rocks of the Pilbara Craton.* Journal of African Earth Sciences, v. 117, p. 124–134, 2016.
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. *Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, eastern Brazil.* Marine and Petroleum Geology, v. 33, p. 127–139, 2012.
- ALKMIM, F. F.; TEIXEIRA, W. *The Paleoproterozoic Mineiro Belt and the Quadrilátero Ferrífero.* In: HEILBRON, M. *et al.* (eds.). São Francisco Craton, Eastern Brazil. Cham: Springer, 2017. p. 71–94.
- ALMEIDA, F. F. M. *O cráton do São Francisco.* Revista Brasileira de Geociências, v. 7, n. 4, p. 349–364, 1977.
- ALMEIDA, F. F. M. *et al.* *Brazilian structural provinces: an introduction.* Earth-Science Reviews, v. 17, n. 1–2, p. 1–29, 1981.
- ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES, B. B.; CARNEIRO, C. D. R. *The origin and evolution of the South American Platform.* Earth-Science Reviews, v. 50, n. 1–2, p. 77–111, 2000.
- BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. *Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits.* Ore Geology Reviews, v. 32, p. 471–499, 2007.
- BAPTISTA, G. M. M. *Sensoriamento remoto hiperespectral: o novo paradigma nos estudos dos solos tropicais.* São José dos Campos: Editora Universa, 2006. 212 p.
- BAPTISTA, G. M. M.; MADEIRA NETTO, J. S.; SOUZA, D. T. M. *Reflectância dos solos.* In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. (orgs.). Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. cap. 5, p. 153–177.
- BEDINI, E. *The use of hyperspectral remote sensing for mineral exploration: a review.* Journal of Hyperspectral Remote Sensing, v. 7, n. 4, p. 189–211, 2017.

BROUWER, P. *Theory of XRF: getting acquainted with the principles*. Almelo: PANalytical, 2003.

CARNEIRO, M. A. *O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano*. 1992. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

CLARK, R. N. *Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy*. In: RENCZ, A. N. (ed.). *Manual of Remote Sensing*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. p. 3–52.

CLARK, R. N. *et al.* *High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals*. *Journal of Geophysical Research*, v. 95, n. B8, p. 12653–12680, 1990.

CLARK, R. N. *et al.* *USGS digital spectral library splib06a*. U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, 2007.

DORR, J. V. N. *Reservas estimadas de minérios de ferro no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, 1957.

DORR, J. V. N. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Washington: U.S. Geological Survey, 1969. 110 p. (Professional Paper 641-A).

ENDO, I. *et al.* *Estratigrafia e arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero: nota explicativa do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Ouro Preto: Departamento de Geologia da Escola de Minas, UFOP, 2019.

ENDO, I. *et al.* *Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero*. In: LOPES, R. C. (org.). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte: 3i Editora, 2020. cap. 2, p. 72–113.

FARINA, F.; ALBERT, C.; LANA, C. *The Neoarchean transition between medium and high-K granitoids: clues from the Southern São Francisco Craton (Brazil)*. *Precambrian Research*, v. 266, p. 375–394, 2015.

- FARINA, F. *et al.* *The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil: current models and open questions.* Journal of South American Earth Sciences, v. 68, p. 4–21, 2016.
- FERNANDES, G. W. *et al.* *Challenges for the conservation of vanishing megadiverse rupestrian grasslands.* Natureza & Conservação, v. 12, n. 2, p. 162–165, 2014.
- FERNANDES, G. W. *et al.* (eds.). *Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil.* Cham: Springer International Publishing, 2016.
- HUNT, G. R. *Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared.* Geophysics, v. 42, n. 3, p. 501–513, 1977.
- HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. *Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: I. silicate minerals.* Modern Geology, v. 1, p. 283–300, 1970.
- HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W.; LENHOFF, C. J. *Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: III. oxides and hydroxides.* Modern Geology, v. 2, p. 195–205, 1971.
- JANSSEN, L. L. F.; HUURNEMAN, G. C. *Principles of remote sensing: an introductory textbook.* 2. ed. Enschede: ITC, 2001.
- JENKINS, R. *X-ray fluorescence spectrometry.* 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1999.
- JENSEN, J. R. *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective.* 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2009.
- LANA, C. *et al.* *The ancestry and magmatic evolution of Archean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero Province, southeast Brazil.* Precambrian Research, v. 231, p. 157–173, 2013.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. *Remote sensing and image interpretation.* 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- MADEIRA NETTO, J. S. *Spectral reflectance properties of soils.* 1996. Tese (Doutorado) – Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1996.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. *Fundamentos de espectrorradiometria*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. *Fundamentos de espectrorradiometria*. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. (orgs.). Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. cap. 1, p. 12–37.

OLIVEIRA, M. *Caracterização espectral das cangas ferruginosas e quartzitos dos campos rupestres da Serra da Brígida, Quadrilátero Ferrífero, Ouro Preto, Minas Gerais*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

PEYGHAMBARI, S.; ZHANG, Y. *Hyperspectral remote sensing in lithological mapping, mineral exploration, and environmental geology: an updated review*. Journal of Applied Remote Sensing, v. 15, n. 3, art. 032001, 2021.

REIF, M. K.; THEEL, H. J. *Remote sensing for restoration ecology: application for restoring degraded, damaged, transformed, or destroyed ecosystems*. Integrated Environmental Assessment and Management, v. 13, n. 3, p. 614–630, 2017.

ROLLINSON, H. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. 2. ed. London: Routledge, 2014.

SCHORSCHER, H. D. *Komatiítos na estrutura Greenstone Belt Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. Resumos... Recife: SBG, 1978. p. 292–293.

SGAVETTI, M. et al. *Reflectance spectroscopy (0.3–2.5  $\mu$ m) at various scales for bulk-rock identification*. Geosphere, v. 2, n. 1, p. 1–13, 2006.

SHERMAN, D. M.; WAITE, T. D. *Electronic spectra of  $Fe^{3+}$  oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV*. American Mineralogist, v. 70, n. 11–12, p. 1262–1269, 1985.

SOUSA, S. S. et al. *Iron ore mining areas and their reclamation in Minas Gerais State, Brazil: impacts on soil physical properties*. SN Applied Sciences, v. 2, art. 1659, 2020.

VAN DER MEER, F. D. *et al.* *Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: a review.* International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 14, n. 1, p. 112–128, 2012.

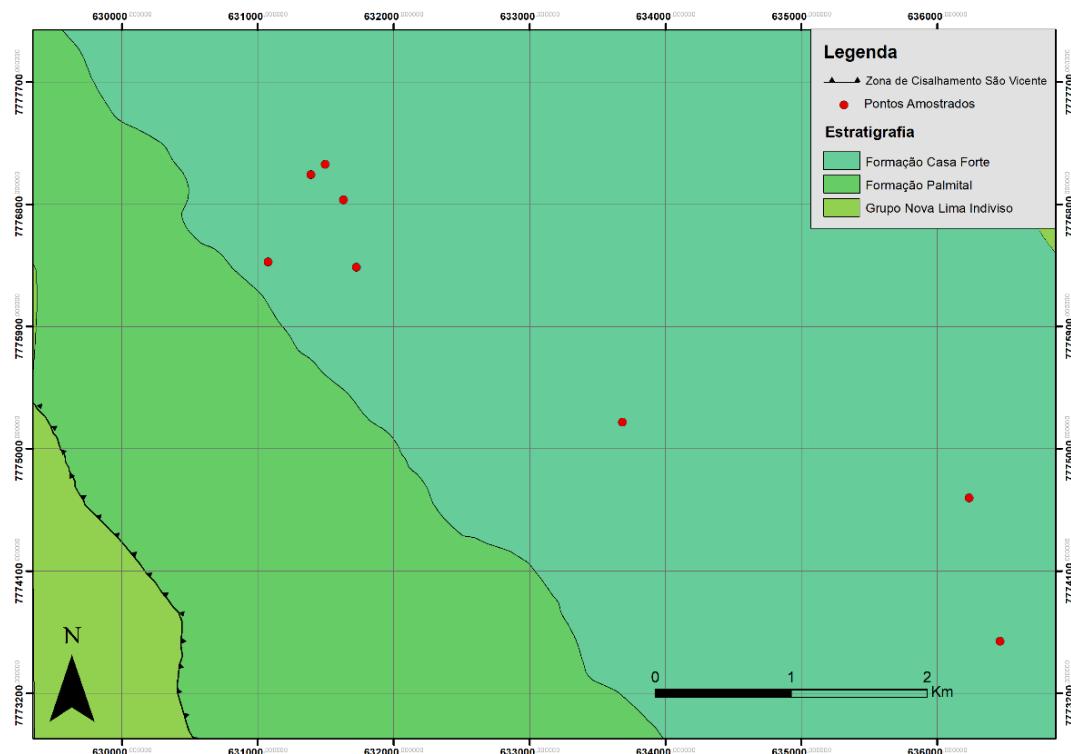
YAN, D.; ZHAO, F.; SUN, O. J. *Assessment of vegetation establishment on tailings dam at an iron ore mining site of suburban Beijing, China, 7 years after reclamation with contrasting site treatment methods.* Environmental Management, v. 52, p. 748–757, 2013.

## ANEXOS

**Anexo A** – Identificação das amostras e coordenadas dos pontos de coleta na área de estudo, expressas em coordenadas UTM, datum SIRGAS 2000.

Amostra	Tipo de Amostra	X (m)	Y (m)
NLR-01	Rocha	631073,8394	7776374,238
NLR-04	Rocha	631725,1066	7776336,425
NLR-05	Rocha	633682,9671	7775194,759
NLR-06	Rocha	636232,7382	7774637,071
NLR-07	Rocha	636459,4018	7773581,712
NLR-08	Rocha	631390,3455	7777016,984
NLSO-02	Solo	631495,5987	7777094,195
NLSO-03	Solo	631630,5658	7776831,107
NLSO-04	Solo	631725,1066	7776336,425
NLSO-05	Solo	631390,3455	7777016,984

## Anexo B – Mapa Geológico da Área de Estudo com Pontos de Amostragem.



Fonte: Elaborado pelo autor. Base cartográfica modificada de Endo et al. (2020).

**Anexo C – Composição geoquímica média das amostras analisadas, expressa em óxidos (% em peso), obtida a partir das leituras de fluorescência de raios X.**

Sample	Mode	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
NLR-08	Mining	48,63656	20,48483	26,0956	n.d	n.d	3,719564	0,783173	n.d	0,01856	n.d	0,089736
NLR-08	Mining	73,59705	36,57543	5,627299	1,372409	n.d	4,694929	0,549639	0,004648	0,025893	0,158809	0,061821
NLR-08	Mining	65,45167	51,8851	0,841521	1,535254	n.d	5,944821	0,469737	0,00594	n.d	n.d	0,034345
NLR-01A	Mining	103,2957	2,621681	12,71489	n.d	0,012173	0,045173	0,037699	0,035508	0,095093	0,089642	0,009061
NLR-01A	Mining	62,40017	7,895087	9,956288	n.d	0,043095	0,263205	0,21285	0,002841	0,170938	0,439472	0,014323
NLR-01A	Mining	26,13561	6,699222	18,19165	n.d	0,186513	0,409925	0,458894	0,034088	0,186749	0,58255	0,013007
NLR-01B	Mining	31,03525	10,96061	8,33701	n.d	0,161328	0,56556	0,643386	0,018335	0,206226	0,683179	0,014907
NLR-01B	Mining	56,32649	11,59454	2,645088	n.d	0,011473	0,089622	0,052378	n.d	0,220433	0,063674	0,006284
NLR-01B	Mining	77,11492	9,964656	2,326694	0,403464	0,043655	0,224176	0,592342	0,002066	0,114112	0,302137	0,0076
NLR-04	Mining	58,72871	17,93816	1,501328	n.d	0,010214	2,306207	0,281242	0,00297	0,072867	n.d	0,0152
NLR-04	Mining	58,66987	31,09834	3,419842	0,50744	0,084792	2,988974	0,451888	0,011363	0,175521	0,19976	0,037999
NLR-04	Mining	44,27153	15,42285	14,55749	n.d	0,201345	1,043906	0,580332	0,018335	0,30636	1,021523	0,020461
NLR-05	Mining	63,32349	36,41293	1,824726	0,466314	n.d	4,206102	0,26823	n.d	0,062326	n.d	0,019438
NLR-05	Mining	57,99086	25,40055	18,36893	1,233775	0,029243	3,304459	0,27974	0,011363	0,308422	0,098632	0,026015
NLR-05	Mining	67,42603	32,76034	2,863975	0,611747	n.d	3,508879	0,207845	n.d	0,022456	n.d	0,016515
NLR-06	Mining	29,64834	27,15552	12,54247	n.d	0,050931	2,688065	0,534459	0,043643	0,513044	0,246953	0,057291
NLR-06	Mining	84,01566	14,04087	6,350584	0,634134	0,039038	1,405527	0,475242	0,028148	0,228453	0,300639	0,019292
NLR-06	Mining	72,89066	31,128	7,899664	0,935613	n.d	3,355775	0,468736	0,051002	0,186749	0,031962	0,030838
NLR-07	Mining	79,62282	8,248423	5,836035	2,988257	0,015531	0,029392	0,059551	0,029439	0,055681	n.d	0,009646
NLR-07	Mining	51,3509	26,97564	5,018533	1,17789	0,276482	0,462085	0,191498	0,019884	0,248388	0,196514	0,0114
NLR-07	Mining	87,39575	10,20254	8,340727	n.d	0,027284	0,079624	0,114098	n.d	0,15192	0,251448	0,019438
NLSO-02	Mining	32,08244	9,557091	2,438925	n.d	0,015951	1,557909	0,53179	n.d	0,083636	n.d	0,018707
NLSO-02	Mining	32,07752	9,96031	2,499973	n.d	0,009934	1,600672	0,498595	0,002066	0,078824	n.d	0,019584
NLSO-03	Mining	39,80638	8,110112	0,970623	n.d	0,013013	1,388904	0,327448	n.d	0,079512	n.d	0,010231

NLSO-03	Mining	33,58508	7,668158	0,969051	n.d	0,013992	1,465998	0,277572	n.d	0,088448	n.d	0,011254
NLSO-04	Mining	48,27245	10,12942	8,477692	n.d	0,01833	2,732394	0,475075	0,068692	0,17323	n.d	0,032738
NLSO-04	Mining	40,02716	7,060684	8,011038	n.d	0,015111	2,551584	0,396507	0,047645	0,142296	n.d	0,030984
NLSO-05	Mining	43,08251	6,204362	1,608841	n.d	0,011194	1,129674	0,198504	0,001937	0,101967	n.d	0,008477
NLSO-05	Mining	38,72433	5,96364	1,665172	n.d	0,015951	1,260493	0,228697	n.d	0,087302	n.d	0,010084