

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
ENGENHARIA DE MINAS

BRUNO PEREIRA DOS SANTOS SANTOS

**USO DE SENSOR HIPERESPECTRAL NO PLANEJAMENTO E
EXPLORAÇÃO DE LAVRA DE CALCÁRIO**

Caçapava do Sul
2026

BRUNO PEREIRA DOS SANTOS SANTOS

**USO DE SENSOR HIPERESPECTRAL NO PLANEJAMENTO E
EXPLORAÇÃO DE LAVRA DE CALCÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Ítalo Gomes Gonçalves

**Caçapava do Sul
2026**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

S237u PEREIRA DOS SANTOS SANTOS, Bruno.

Uso de sensor hiperespectral no planejamento e exploração de lavra de calcário / Bruno Pereira dos Santos Santos.
18 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE MINAS, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Ítalo Gomes Gonçalves .

1. Palavras-chave: sensoriamento remoto hiperespectral. 2. Calcário. 3. Assinatura espectral. 4. Petrografia. 5. Planejamento de lavra. I. Título.

BRUNO PEREIRA DOS SANTOS SANTOS

**USO DE SENSOR HIPERESPECTRAL NO PLANEJAMENTO E
EXPLORAÇÃO DE LAVRA DE CALCÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
de Minas da Universidade Federal do
Pampa como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Minas.

Dissertação defendida e aprovada em: 09 de julho de 2026.

Banca examinadora:

Dra. Sissa Kumaira
Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Igor Antonio Cancela Melnik
Universidade Federal do Pampa



Assinado eletronicamente por **MARCUS VINICIUS APARECIDO GOMES DE LIMA**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2026, às 13:31, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **IGOR ANTONIO CANCELA MELNIK**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2026, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SISSA KUMAIRA**, **GEOLOGO**, em 20/07/2026, às 16:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2097944** e o código CRC **BA060A14**.

RESUMO

O setor de mineração busca continuamente métodos que aumentem a eficiência na prospecção e no planejamento da lavra, reduzindo custos operacionais e impactos ambientais. Nesse contexto, o sensoriamento remoto hiperespectral destaca-se por possibilitar a identificação de minerais a partir de suas assinaturas espectrais. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação de um sensor hiperespectral na identificação de minerais de interesse econômico presentes em uma jazida de calcário, visando demonstrar seu potencial para o planejamento e a exploração mineral. Para isso, foram realizadas análises espectrais de amostras representativas da área de estudo, abrangendo a faixa espectral de 350 a 2500 nm, complementadas por análises petrográficas em lâminas delgadas para validação da composição mineralógica. As assinaturas espectrais obtidas foram comparadas com bibliotecas espectrais de referência, permitindo correlacionar as feições de absorção com os minerais identificados. Os resultados evidenciaram a ocorrência de bandas de absorção características dos minerais carbonáticos, principalmente entre 2,30 e 2,35 μm , compatíveis com calcita e dolomita, além da identificação de minerais silicáticos, como a tremolita, confirmada pelas análises petrográficas. A integração entre as informações espectrais e mineralógicas demonstrou elevada eficiência na diferenciação entre minério e material estéril, evidenciando o potencial do sensoriamento hiperespectral como ferramenta de apoio ao planejamento da lavra, à prospecção mineral e à tomada de decisão na exploração de jazidas de calcário.

Palavras-chave: Palavras-chave: sensoriamento remoto hiperespectral; calcário; assinatura espectral; petrografia; planejamento de lavra.

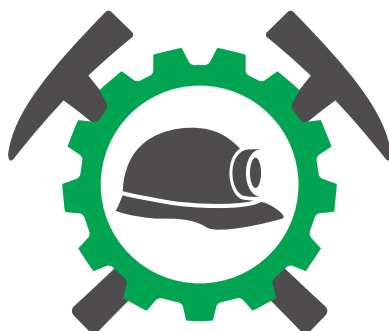
ABSTRACT

The mining industry continuously seeks methods to improve the efficiency of mineral exploration and mine planning while reducing operational costs and environmental impacts. In this context, hyperspectral remote sensing has emerged as a valuable tool for identifying minerals based on their spectral signatures. This study aimed to evaluate the application of a hyperspectral sensor for the identification of economically important minerals in a limestone deposit, demonstrating its potential for mine planning and mineral exploration. Spectral analyses were performed on representative samples collected from the study area over the spectral range of 350–2500 nm and complemented by petrographic analyses of thin sections to validate the mineralogical composition. The acquired spectral signatures were compared with reference spectral libraries, enabling the correlation of absorption features with the identified minerals. The results revealed characteristic absorption bands of carbonate minerals, particularly between 2.30 and 2.35 μm , consistent with calcite and dolomite, as well as the identification of silicate minerals, such as tremolite, confirmed through petrographic analyses. The integration of spectral and mineralogical data demonstrated high efficiency in distinguishing ore from waste material, highlighting the potential of hyperspectral remote sensing as a supporting tool for mine planning, mineral exploration, and decision-making in the exploitation of limestone deposits.

Keywords: hyperspectral remote sensing; limestone; spectral signature; petrography; mine planning

SUMÁRIO

1	Introdução	8
1.1	Área de Estudo	9
1.2	Contexto Geológico	9
1.3	Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF)	10
1.4	Geologia Local	10
2	Revisão bibliográfica	10
2.1	Sensoriamento Remoto	10
2.2	Espectroscopia de Reflectância	10
2.3	Princípios Físicos da Interação entre a Radiação Eletromagnética e a Matéria	12
2.4	Comportamento Espectral de Carbonatos	12
2.5	Calcário	13
2.6	Calcinação	13
3	Metodologia	13
3.1	Etapas da pesquisa	14
3.1.1	<i>Coleta e Preparação das Amostras:</i>	14
3.1.2	<i>Caracterização Mineralógica</i>	14
3.1.3	<i>Aquisição e Processamento das Assinaturas Espectrais</i>	14
4	Resultados e Discussão	15
4.1	Aquisição das Assinaturas Espectrais	15
4.2	Análise espectral e identificação mineralógica	15
4.2.1	<i>Mármore Branco</i>	15
4.2.2	<i>Mármore Rosa</i>	16
4.2.3	<i>Diabásio</i>	16
4.3	Caracterização Mineralógica	16
5	Conclusão	16
6	Agradecimentos	16
	Referências	18



Uso de sensor hiperespectral no planejamento e exploração de lavra de calcário

Autor: Bruno Pereira dos Santos Santos
Orientador: Prof. Dr. Ítalo Gomes Gonçalves
Semestre: 2026/1

1 Introdução

A exploração mineral desempenha papel fundamental no desenvolvimento econômico e industrial, fornecendo insumos essenciais para diversos setores produtivos. Entre esses recursos, o calcário se destaca por sua ampla utilização, sobretudo na indústria cimenteira, siderúrgica, agrícola e química. A demanda crescente por esse mineral torna necessária a adoção de técnicas de prospecção e monitoramento mais precisas, eficientes e ambientalmente responsáveis.

Tradicionalmente, o mapeamento de jazidas minerais tem se baseado em métodos de campo, sondagens e análises laboratoriais, que, embora precisos, apresentam elevado custo, consumo de tempo e impacto ambiental. Nesse contexto, o sensoriamento remoto surge como alternativa promissora, possibilitando a obtenção de informações espaciais em grande escala. O mapeamento geológico regional e a exploração mineral estão entre as principais áreas que se beneficiarão dessa tecnologia, já que minerais e rochas apresentam assinaturas espectrais diagnósticas em todo o espectro eletromagnético, permitindo o mapeamento de sua composição química e abundância relativa (CRÓSTA et al., 2016).

Dentre as técnicas disponíveis, o sensoriamento hiperespectral se destaca pela capacidade de registrar dados em centenas de faixas espectrais estreitas e contínuas, permitindo a discriminação detalhada de minerais com base em suas assinaturas espectrais. Essa característica possibilita identificar depósitos minerais de forma mais rápida e precisa, diferenciando-os de outros litotipos e contribuindo para a avaliação de qualidade e quantidade

do material (PLAZA, 2017).

O funcionamento do sensoriamento hiperespectral fundamenta-se na interação da radiação eletromagnética com a matéria, princípio físico descrito pela espectroscopia. Quando a radiação incide sobre um mineral, sua energia pode ser refletida, absorvida ou transmitida, conforme a composição química e a estrutura cristalina do material. As absorções ocorrem em comprimentos de onda específicos, principalmente em função das vibrações das ligações químicas e das transições eletrônicas presentes nos minerais, originando assinaturas espectrais características que permitem sua identificação e diferenciação (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A aplicação de sensores hiperespectrais, tanto em plataformas orbitais, terrestres e aerotransportadas, vem ganhando espaço na área de geociências, oferecendo subsídios para a tomada de decisão no planejamento da exploração mineral. Além de aumentar a eficiência na identificação e caracterização de jazidas, essa tecnologia reduz custos operacionais e impactos ambientais associados aos métodos tradicionais (BEDINI, 2017).

Na mineração de calcário, a presença de minerais silicatados, especialmente o quartzo, representa um desafio relevante para o beneficiamento e, em especial, para o processo de calcinação. Durante essa etapa, o quartzo não se decompõe nem reage nas mesmas condições térmicas em que ocorre a dissociação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2). Essa diferença de comportamento térmico pode gerar a formação de silicatos indesejáveis, reduzir a reatividade da cal e comprometer a pureza do produto final.

Esses fatores impactam diretamente a eficiência tér-

mica do processo e a qualidade do material produzido, tornando o controle mineralógico uma etapa essencial do planejamento e da lavra em depósitos carbonáticos. Entretanto, a identificação visual do quartzo e de outros minerais silicáticos em campo é limitada, especialmente em frentes de lavra onde as variações mineralógicas são sutis e heterogêneas. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicação de sensores hiperespectrais no mapeamento, exploração e planejamento de jazidas de calcário, destacando suas potencialidades, limitações e contribuições para o setor mineral.

Nesse contexto, as técnicas de sensoriamento remoto hiperespectral apresentam-se como uma ferramenta promissora para a caracterização mineralógica, pois permitem identificar minerais com base em suas assinaturas espectrais específicas, de forma rápida, não destrutiva e em grandes áreas. A aplicação dessa tecnologia no planejamento de lavra pode auxiliar na delimitação de zonas de estéril e de minério útil, contribuindo para um aproveitamento mais eficiente da jazida e para a melhoria do controle de qualidade durante o processo produtivo.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho é analisar a aplicação de sensores hiperespectrais no mapeamento visando à detecção de minerais de quartzo, carbonatos e silicatos, possibilitando uma melhor definição entre o estéril e o minério de interesse e, como consequência, uma exploração e um planejamento mais eficiente da jazida de calcário.

Para o alcance desse objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Adquirir assinaturas espectrais das rochas;
- Realizar o processamento e a análise de imagens hiperespectrais coletadas.
- Diferenciar zonas com maiores e menores teores de sílica.

1.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada no distrito de Caieiras, no município de Caçapava do Sul, região Centro-Sul do estado do Rio Grande do Sul. O município situa-se a cerca de 260 km de Porto Alegre, sendo reconhecido por sua expressiva riqueza geológica e mineral. Inserido no contexto do Escudo Sul-rio-grandense, Caçapava do Sul abriga importantes ocorrências de recursos minerais e destaca-se como um dos principais polos da atividade minerária no estado.

O distrito de Caieiras é reconhecido pela tradição na exploração de rochas carbonáticas. A atividade minerária, desenvolvida há mais de 100 anos, é voltada principalmente para a extração de mármore destinado à produção de calcário agrícola e à fabricação de cal, desempenhando papel relevante na economia local e regional.

A escolha da área de estudo deve-se à importância da mineração de calcário para o município e à presença de depósitos carbonáticos representativos, que tornam a região um ambiente adequado para avaliar a aplicação do sensoriamento remoto hiperespectral na identificação de minerais e no apoio às atividades de planejamento e exploração mineral.

1.2 Contexto Geológico

A área de estudo está inserida no contexto do Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG). O ESRG localiza-se na parte sul da Plataforma Sul-Americana e da Província Mantiqueira, região onde ocorrem rochas ígneas, metamórficas e sedimentares pré-paleozóicas com gênese relacionada aos ciclos Transamazônico, no Paleoproterozoico, e Brasileiro/Pan-Africano, no Neoproterozoico. O Escudo Sul-Rio-Grandense é composto por um pedaço de um antigo núcleo cratônico (Cráton Rio de La Plata), chamado de Terreno Taquembó, em contato com uma zona de acreção e retrabalhamento crustal (originada durante o ciclo Brasileiro/Pan-Africano), chamada de Cinturão Dom Feliciano (PASETTO, 2018).

O ESRG é dividido em quatro Terrenos: Terreno Taquembó (complexo granulítico paleoproterozóico retrabalhado parcialmente no Neoproterozóico), Terreno São Gabriel (TSG cujas unidades foram em grande parte formadas por acreção juvenil ou rochas derivadas de um manto neoproterozóico), Terreno Tijucas (rochas granito-gnáissicas e anfibolíticas paleoproterozóicas, rochas supracrustais e plutônicas com vulcanismo cálcio-alcalino e rochas metassedimentares deformadas em ambiente dúctil-rúptil), e o Batólito Pelotas (formado por suítes e complexos graníticos brasileiros com seitos do embasamento (HARTMANN; JUNIOR, 2007).

As unidades principais do TSG são associações litológicas relacionadas às fases de desenvolvimento do Arco de Vila Nova (PHILIPP; BITENCOURT; JUNGES, 2007) e estão justapostas tectonicamente como faixas alongadas limitadas por zonas de cisalhamento dúcteis. São rochas juvenis de idades neoproterozóicas definidas por (HARTMANN; JUNIOR, 2007) como: Rochas plutônicas e metaplutônicas, cálcio-alcalinas baixo a médio-K, com xenólitos de rochas metassedimentares (Complexo Cambaí) da porção inferior do arco, Rochas metavulcânicas ácidas, intermediárias e básicas, e unidades metassedimentares associadas (Complexos Palma/Bossoroca) da porção superior do arco, e, na área de interesse deste estudo, a geologia é caracterizada pela ocorrência do Complexo Granítico Caçapava do Sul (Paleozoico Inferior), circundada pelo Complexo Metamórfico Passo Feio (CPMF, metapelitos, xistos quartzo-feldspáticos, quartzitos e meta-vulcânicas subordinadas) - neoproterozoico.

1.3 Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF)

Ribeiro et al. (1966) e BITENCOURT (1983) definem o CMPF como uma sequência metamórfica vulcano-sedimentar composta por ardósias, filitos, xisto pelíticos, xistos graníticos, mármore, quartzito, metaconglomerado, rochas calcosilicatadas, anfibolitos e metabasaltos subordinados, e xisto magnesiano formados principalmente na fácies anfibolito inferior.

1.4 Geologia Local

A geologia encontrada da área de estudo é bastante diversificada, podendo conter anfibolitos, metapelitos, mármore, granitos, diques máficos e outros. Os mármore presentes na mina têm aspecto lenticular com alto grau de fraturamento e apresentam contatos nítidos (PASETTO, 2018).

Segundo BORTOLOTTI (1986) estas rochas da área de estudo são definidas como mármore dolomíticos impuros. Os mármore apresentam bandas milimétricas a centimétricas irregulares e descontínuas, com colorações variando desde verde, cinza, branco até rosa. São raras as estruturas completamente maciças. Sendo a textura granoblástica predominante na rocha, com grãos equidimensionais.

BITENCOURT (1983) definiu as rochas metapelíticas como xistos e filitos a muscovita, biotita e/ou clorita. Os xistos pelíticos ocorrem tanto como bandas de espessura variável, intercaladas com anfibolitos. BITENCOURT (1983) aponta que anfibolitos xistos são consideradas aquelas rochas de coloração preta ou esverdeada, com estrutura planar e contínua. Frequentemente essas rochas apresentam intercalações milimétricas a centimétricas com rochas metapelíticas ricas em mica com contato abrupto. O quartzo ocorre nessas rochas de maneira restrita.

Também ocorrem na área de estudo as rochas do Complexo Granítico Caçapava do Sul. BITENCOURT e NARDI (1989) definiram pelo menos três fácies, reconhecíveis petrográfica e geoquimicamente. Os biotita granitóides são rochas de coloração cinza, tornando-se róseas quando intemperizadas. São ricos em biotita e allanita como minerais acessórios. Os leucogranitóides são rochas de coloração rósea, com baixo teor de minerais máficos, contendo, localizadamente, granada e/ou moscovita. Os granitóides transicionais ocorrem de preferência na porção central e este do complexo e apresentam características intermediárias entre os dois primeiros tipos.

Diques e sills (soleiras) de diabásio com textura ofítica são comumente encontrados em toda a área da mina. De acordo com Ribeiro et al. (1966), estão relacionados com a Formação Serra Geral. Estas rochas apresentam alterações típicas de contato térmico e também pequenas oxidações de ferro.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Sensoriamento Remoto

No Sensoriamento Remoto óptico registra-se e analisam-se as interações entre a radiação eletromagnética emitida pelo sol (REM) e as substâncias que compõem a superfície da Terra. Dessa forma, o sensoriamento remoto mede as trocas de energia entre os fenômenos ou objetos e o meio ambiente, as quais se manifestam predominantemente por emissão ou modificações na radiação eletromagnética (LIMA, 2011).

Segundo LIMA (2011), este processo não é possível em todas as partes do espectro eletromagnético, porque a transmissividade atmosférica é variável para os diversos comprimentos de onda. A REM trafega pelo espaço e atinge a superfície terrestre em diferentes comprimentos de onda (λ). As técnicas de sensoriamento remoto por sistemas passivos utilizam somente o intervalo do espectro eletromagnético compreendido entre 0,38 e 3,0 μm , chamado de região de energia refletida, isso porque a energia que os sensores detectam nessa região é basicamente originada da reflexão da energia solar pelos objetos da superfície. Esse espectro é dividido em três sub-regiões: visível (VIS) no intervalo entre 0,38 μm e 0,72 μm , infravermelho próximo (NIR) de 0,72 μm a 1,3 μm , e infravermelho de ondas curtas (SWIR) de 1,3 a 3,0 μm .

O espectro eletromagnético observado na Figura 1 corresponde a uma forma organizada de apresentar as principais faixas de radiação conforme seus comprimentos de onda. Ele se inicia com os raios cósmicos, raios gama e raios X, que possuem comprimentos de onda na ordem do picômetro (pm), ou 10^{-12} m. Em seguida, encontra-se a região do ultravioleta, seguida pelas faixas da luz visível e do infravermelho, cujos valores são normalmente expressos em nanômetros (nm), equivalentes a 10^{-9} m, ou em micrômetros (μm), equivalentes a 10^{-6} m. A partir da região das micro-ondas, os comprimentos de onda passam a ser representados em milímetros (mm), ou 10^{-3} m, enquanto as ondas de rádio abrangem comprimentos variando desde a escala de metros (m) até quilômetros (km), (BAPTISTA, 2021).

2.2 Espectroscopia de Reflectância

A espectroscopia de reflectância possibilita caracterizar diferentes materiais, observando as variações nos padrões de reflectância das bandas espectrais em variados comprimentos de onda. Baseia-se no princípio de incidência de iluminação sobre uma determinada superfície e registro do espectro da luz refletida para extração das respostas espectrais que são sensíveis à composição do material estudado (FANTE et al., 2019).

Segundo Meneses e Netto (2001), pelo princípio da conservação de energia, quando a radiação eletromagnética

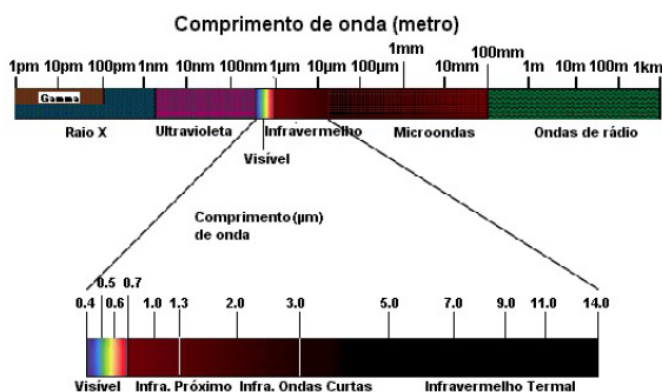


Figura 1: Espectro eletromagnético. Fonte: Baptista (2021).

(REM) incide sobre a superfície de um material, ela é dividida em três parcelas: uma parte é refletida pela superfície, outra é absorvida pelos átomos ou moléculas do material e uma terceira pode ser transmitida, caso a matéria apresente algum grau de transparência. Assim, a intensidade da energia incidente corresponde à soma desses três componentes, conforme pode ser visto na Figura 2.

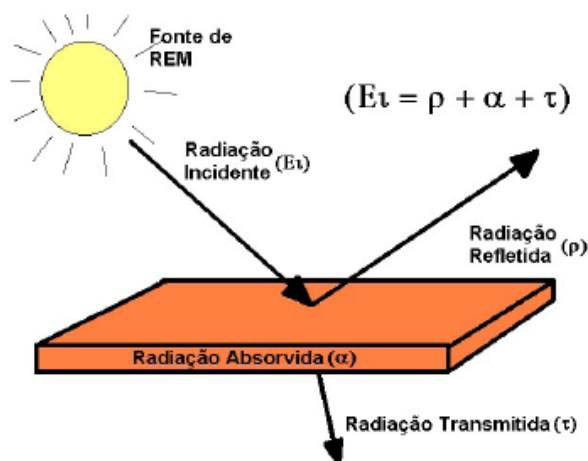


Figura 2: Comportamento da Radiação Eletromagnética. Fonte: Baptista (2021).

A relação entre a energia incidente no alvo e o tipo de fenômeno resultante da interação, pode fornecer os parâmetros espectrais de Reflectância, Absortância e Transmittância. A Reflectância é o processo de reflexo da radiação no objeto, é dada pela razão entre o fluxo radiante refletido por uma superfície e o fluxo radiante incidente nela. A Absortância é dada pela razão entre o fluxo radiante absorvido por uma superfície e o fluxo radiante incidente nela e, a Transmittância é definida como a razão entre o fluxo radiante transmitido através de uma superfície e o fluxo radiante incidente nela (JENSEN, 2009).

Dentre os fatores que controlam o comportamento da reflectância nos diferentes materiais destacam-se os pro-

cessos de interação da radiação eletromagnética com a superfície dos objetos, as quais podem ser macroscópicas e microscópicas.

De acordo com Meneses e Netto (2001), as interações macroscópicas são aquelas controladas pelas propriedades ópticas do material e envolvem efeitos como refração, difração e espalhamento. Considera-se então que os fatores macroscópicos que mais controlam a reflectância nas medidas feitas em campo ou em laboratório são os relacionados às características físicas e texturais da superfície amostrada, que por sua vez, dependem do arranjo textural dos elementos, da forma, do tamanho, da estrutura, da granulometria, da esfericidade ou da compactação dos grãos.

As interações microscópicas, por sua vez, são responsáveis por determinadas feições de absorção espectral da radiação cujas características dependem do tipo de estrutura interna dos constituintes, do tamanho dos seus raios iônicos, das forças de ligação e das impurezas iônicas contidas no material.

Os materiais se diferenciam entre si por constituírem sistemas com diferentes arranjos de níveis de energia, e a reflectância seria uma resposta indireta das mudanças (transições) ocorridas nesses níveis de energia. A Radiometria espectral é fundamental para o sensoriamento remoto, visto que, é por meio das medidas radiométricas que se descobrem com qual intensidade um material reflete a radiação eletromagnética nos diferentes comprimentos de onda do espectro (MENESES; NETTO, 2001).

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto multiespectral e hiperespectral para discriminação de materiais geológicos está baseada nas diferenças existentes entre os comportamentos espectrais de minerais e rochas (PEDROSA, 2010).

De acordo com Quental et al. (2020), as características distintas dos sensores implicam um nível variável de informação extraída sobre os materiais alvo, ou seja, discriminação de grupos de minerais em multiespectral e identificação mineralógica ou química com hiperespectral.

Na espectroscopia hiperespectral ou de imagem (*Imaging Spectroscopy*; IS), dezenas ou centenas de bandas espectrais contíguas coletam os espectros de energia recebidos no sensor para cada unidade espacial (pixel) com alta relação sinal-ruído. Os espectros são usados para extrair informações com base na assinatura da interação de matéria e energia. Em outras palavras, os dados IS expandem o conceito de ponto da espectroscopia, reunindo dados espaciais em grandes áreas com alta resolução espectral (QUENTAL et al., 2020).

2.3 Princípios Físicos da Interação entre a Radiação Eletromagnética e a Matéria

A espectroscopia fundamenta-se na interação da radiação eletromagnética com a matéria, fenômeno físico que ocorre quando a energia transportada pela radiação incide sobre átomos, moléculas ou estruturas cristalinas de um material. A radiação eletromagnética propaga-se na forma de ondas caracterizadas por comprimento de onda e frequência, podendo também ser descrita como um fluxo de fótons, cuja energia é diretamente proporcional à frequência da radiação. Ao atingir a superfície de um material, a energia incidente é distribuída entre os processos de reflexão, absorção e transmissão, em proporções que dependem das propriedades físicas e químicas do meio (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A absorção da radiação ocorre quando a energia dos fótons corresponde exatamente à diferença entre dois estados energéticos permitidos da matéria. Nesse processo, a energia incidente é convertida em energia interna, promovendo transições eletrônicas ou excitando modos vibracionais das ligações químicas presentes nas moléculas. Na região do infravermelho, onde se concentram as principais feições espectrais utilizadas na caracterização mineralógica, predominam os fenômenos de absorção associados às vibrações moleculares. Essas vibrações correspondem aos movimentos periódicos dos átomos em torno de suas posições de equilíbrio na estrutura cristalina, podendo ocorrer por estiramento ou deformação angular das ligações químicas. Como cada ligação química possui frequências naturais de vibração determinadas pela massa dos átomos e pela intensidade da ligação entre eles, a absorção ocorre apenas em comprimentos de onda específicos, caracterizando um fenômeno de ressonância (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A estrutura cristalina exerce papel fundamental nesse comportamento, pois determina a organização espacial dos átomos e influencia diretamente seus níveis energéticos e modos vibracionais. Dessa forma, minerais com diferentes composições químicas ou diferentes arranjos cristalográficos apresentam respostas distintas à incidência da radiação eletromagnética. Essa resposta manifesta-se por meio de bandas de absorção e reflexão distribuídas ao longo do espectro eletromagnético, constituindo uma assinatura espectral própria para cada material. Sob o ponto de vista físico, essas assinaturas representam a expressão macroscópica das propriedades atômicas, moleculares e cristalográficas dos minerais, estabelecendo a base científica para sua diferenciação por métodos espectroscópicos (MENESES; ALMEIDA, 2012).

2.4 Comportamento Espectral de Carbonatos

A espectrometria de imagem em aplicações de sensoriamento remoto explora a interação física da radiação

eletromagnética (luz solar) com uma superfície material. Essa interação resulta em propriedades de absorção diagnósticas que podem ser usadas para obter informações quantitativas sobre a mineralogia e a composição química do objeto escaneado como efeito, muitos minerais absorvem e refletem a luz de uma maneira única e mensurável, tornando possível determinar a distribuição e a composição usando um dispositivo de imagem espectral (KURZ et al., 2012).

Enquanto imagens convencionais registram o espectro visível com três bandas discretas (vermelho, verde e azul, RGB), os imageadores hiperespectrais medem potencialmente centenas de bandas, dando uma amostragem quase contínua do espectro eletromagnético. Essa alta amostragem espectral permite que características de absorção mais sutis sejam recuperadas, o que equivale a uma maior capacidade de distinguir até mesmo minerais espectralmente semelhantes (KURZ et al., 2012).

Segundo Kurz et al. (2012), o mapeamento espectral de minerais é baseado na extração de características de propriedades de absorção diagnósticas e mede a posição do comprimento de onda e as profundidades de absorção. Os espectros devem ser normalizados antes que as características de absorção possam ser extraídas para medi-las.

O comprimento de ondas do visível ao infravermelho proximal (VNIR), que corresponde ao intervalo de 0,4 a 1,0 μm , é utilizado para avaliar a presença do íon férrico que é associado a óxidos e hidróxidos. Já o infravermelho de ondas curtas (SWIR), que corresponde ao intervalo de 1,0 a 2,5 μm , indica feições de absorção de hidroxilas e carbonato (FANTE et al., 2019).

Segundo Pedrosa (2010), estudos clássicos sobre o comportamento espectral de carbonatos, descrevem uma série de feições de absorção que aumentam de intensidade com o crescimento do comprimento de onda no intervalo entre 1,6 μm e 2,5 μm . Esse intervalo espectral é de grande relevância para a investigação dos carbonatos, uma vez que nele se encontram as feições de absorção associadas aos modos vibracionais do radical carbonato (CO_3^{2-}), responsáveis por características espectrais diagnósticas desses minerais. A Figura 3 mostra um exemplo de espectro para o mineral de calcita e dolomita.

Ainda conforme Pedrosa (2010), o estudo identificou sete bandas de absorção principais relacionadas às vibrações do grupo carbonato, demonstrando que as posições e larguras dessas bandas são determinantes para a caracterização mineralógica dos diferentes tipos de carbonatos. Dessa forma, torna-se possível distinguir minerais como calcita e dolomita por meio das diferenças sutis nas posições das bandas de absorção observadas no espectro.

Essas variações espectrais refletem as diferenças na composição química e na estrutura cristalina dos minerais carbonáticos, já que a substituição de cátions metálicos

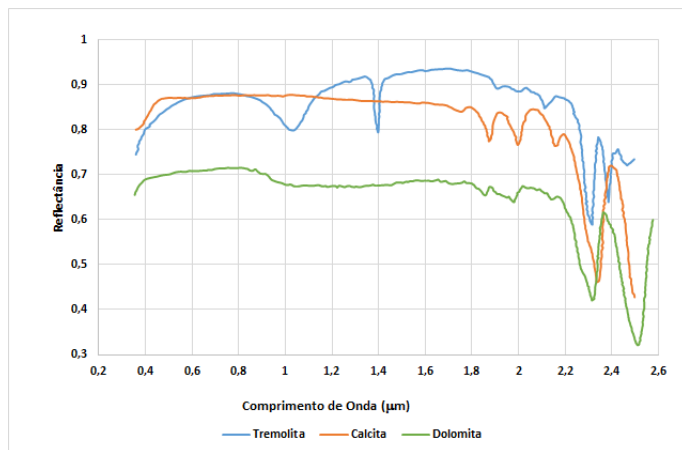


Figura 3: Assinaturas espectrais dos minerais Calcita, Dolomita e Tremolita. Fonte: USGS Spectroscopy Lab e biblioteca espectral mineral IG/UnB.

(como Ca^{2+} e Mg^{2+}) no retículo influencia diretamente as posições das feições de absorção. Assim, a espectroscopia de reflectância no intervalo entre $1,6 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m}$ constitui uma ferramenta essencial para a discriminação mineralógica de carbonatos, tanto em análises laboratoriais quanto em aplicações de sensoriamento remoto (PEDROSA, 2010).

2.5 Calcário

As principais rochas carbonáticas mais comercializadas são o calcário e dolomito. A calcita (CaCO_3) é o principal constituinte mineralógico dos calcários e mármore. Na classificação mineralógica das rochas calcárias, deve ser considerada a variação nas proporções de calcita, dolomita, bem como dos componentes não carbonáticos. Podem conter impurezas devido a presença de matéria orgânica, silicatos, óxidos, fosfatos, sulfetos e outros, que acompanham o processo de deposição do CaCO_3 ou que ocorreram em estágios posteriores à deposição (PEDROSA, 2010).

As impurezas presentes nos calcários influenciam diretamente seu aproveitamento econômico, sendo os argilominerais como caulinita, ilita, clorita, esmectita e outros tipos micáceos – as mais comuns, podendo ocorrer de forma disseminada na rocha ou concentradas em finos leitões, de modo que sua presença em maior quantidade pode converter um calcário de alto cálcio em marga; além disso, compostos de ferro, geralmente na forma de limonita e pirita, e mais raramente hematita e marcasita, também são considerados prejudiciais para aplicações industriais, como em cerâmicas, tintas, papel, plásticos e borracha (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005).

Segundo Sampaio e Almeida (2005) impurezas silicosas distintas dos argilominerais prejudicam o aproveitamento industrial do calcário. A sílica presente sob a forma de areia, grãos de quartzo ou combinada em minerais como

feldspato, mica, talco e serpentinito produz efeitos indesejáveis na qualidade da rocha. Por esse motivo, calcários destinados a usos metalúrgicos e químicos devem apresentar menos de 1 % de alumina e até 2 % de sílica.

2.6 Calcinação

A cal ou óxido de cálcio (CaO) é um produto derivado da calcinação do calcário ou mármore. A cal é produzida com base em calcário com elevado teor de cálcio ou de magnésio. Normalmente, a cal, com elevado cálcio (calcítico), tem menos de 5 por cento de MgO . Quando a cal origina-se de um calcário com elevado teor de magnésio (magnésítico), o produto é conhecido por cal dolomítica.

Segundo Sampaio e Almeida (2005), a calcinação consiste no processo térmico pelo qual o carbonato de cálcio se decompõe, originando em óxido de cálcio (CaO), tradicionalmente denominado cal e dióxido de carbono (CO_2). Esse fenômeno também se aplica à conversão de outros carbonatos metálicos em seus respectivos óxidos, prática que no passado recebia genericamente o nome de "cal". No caso específico do calcário, essa transformação ocorre em temperaturas que se aproximam do ponto de fusão do material, situando-se normalmente entre 900 e 1.000°C .

A produção de cal envolve três fases principais: preparação da matéria-prima, calcinação e, quando necessário, hidratação – processo que deve ser adequado ao tipo de produto final desejado. A etapa de preparação do calcário, que antecede a calcinação, inclui atividades como lavra, britagem, peneiramento e, em alguns casos, lavagem, com o objetivo de reduzir ao máximo o teor de impurezas. Esses procedimentos são empregados principalmente para remover sílica, alumina e óxidos de ferro (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005).

A produção de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) a partir de rochas carbonáticas – como calcário e mármore – requer um rigoroso controle das impurezas presentes. Contaminantes como sílica, alumina e óxidos de ferro devem ser minimizados, pois influenciam diretamente a qualidade e o desempenho da cal e da cal dolomítica obtidas no processo (SILVEIRA; LUZ, 2019).

3 Metodologia

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida com foco na obtenção e análise de assinaturas espectrais de amostras representativas de uma jazida de calcário. Inicialmente, foram selecionadas e coletadas amostras das principais litologias presentes na área de estudo, representando tanto o minério quanto o material estéril. Posteriormente, as amostras foram preparadas para análise, sendo submetidas à identificação mineralógica por meio de estudos petrográficos e, em seguida, à aquisição das

assinaturas espectrais utilizando um espectrorradiômetro hiperespectral. Os dados espectrais obtidos foram analisados e comparados com bibliotecas espectrais de referência, permitindo avaliar o potencial da técnica na diferenciação mineralógica entre os materiais estudados.

3.1 Etapas da pesquisa

O desenvolvimento metodológico do trabalho seguiu as seguintes etapas:

3.1.1 Coleta e Preparação das Amostras:

As amostras foram coletadas em uma pilha pulmão de abastecimento do setor de calcinação da mineradora, a qual recebe material proveniente da frente de lavra e representa a variabilidade mineralógica do minério processado. A seleção das amostras buscou contemplar a diversidade mineralógica observada macroscopicamente em campo, conforme a Figura 4. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para a confecção de lâminas petrográficas, posteriormente analisadas em microscópio de luz polarizada para a identificação dos minerais de interesse do estudo. Em seguida, as amostras foram submetidas às análises espectrais para sua caracterização mineralógica e obtenção das assinaturas espectrais.



Figura 4: Amostras utilizadas para a confecção das lâminas. *Topo:* mármore branco. *Meio:* mármore rosa. *Base:* diabásio. Fonte: Autoria Própria.

3.1.2 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada por meio da análise de lâminas petrográficas em microscópio óptico de luz transmitida e refletida. A identificação dos minerais baseou-se em propriedades ópticas como cor, birrefringência e hábito cristalino.

3.1.3 Aquisição e Processamento das Assinaturas Espectrais

As análises hiperespectrais das amostras foram realizadas no Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto Aplicado ao Meio Ambiente (GEOMA), da Universidade Estadual de Maringá (UEM), utilizando o espectrorradiômetro hiperespectral FieldSpec® 3, fabricado pela Analytical Spectral Devices (ASD), apresentado na Figura 5.



Figura 5: Espectrorradiômetro hiperespectral FieldSpec® 3. Fonte: Manual do Equipamento.

O espectrorradiômetro FieldSpec® 3 é capaz de adquirir medidas de reflectância, radiância, transmitância e irradiância, operando na faixa espectral de 350 a 2500 nm, abrangendo as regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR). O equipamento apresenta resolução espectral de aproximadamente 3 nm na região do VNIR e 10 nm no SWIR, além de intervalo de amostragem de 1,4 nm entre 350 e 1000 nm e de 2 nm entre 1000 e 2500 nm, possibilitando a identificação de feições espectrais características dos diferentes minerais presentes nas amostras.

As curvas espectrais de reflectância foram obtidas para cada amostra e posteriormente processadas para identificação das principais feições de absorção mineral. A interpretação das assinaturas espectrais foi realizada por meio da comparação com bibliotecas espectrais de referência, incluindo a USGS Spectral Library (United States Geological Survey) e a biblioteca espectral mineral do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB). Essa comparação permitiu correlacionar as assinaturas

espectrais com a composição mineralógica determinada por meio das análises petrográficas, possibilitando a identificação dos principais minerais presentes nas amostras e a avaliação do potencial do sensoriamento remoto hiperespectral na diferenciação entre minerais carbonáticos e silicáticos.

4 Resultados e Discussão

4.1 Aquisição das Assinaturas Espectrais

As assinaturas espectrais foram obtidas a partir de três amostras representativas: mármore branco, mármore rosa e diabásio (rocha estéril). Para cada amostra, foram realizadas três medições espectrais em diferentes pontos da superfície, totalizando nove curvas espectrais. As Figuras 6-8 apresentam os espectros obtidos para cada litologia, permitindo a identificação das principais feições de absorção e a comparação do comportamento espectral entre o minério e o estéril.

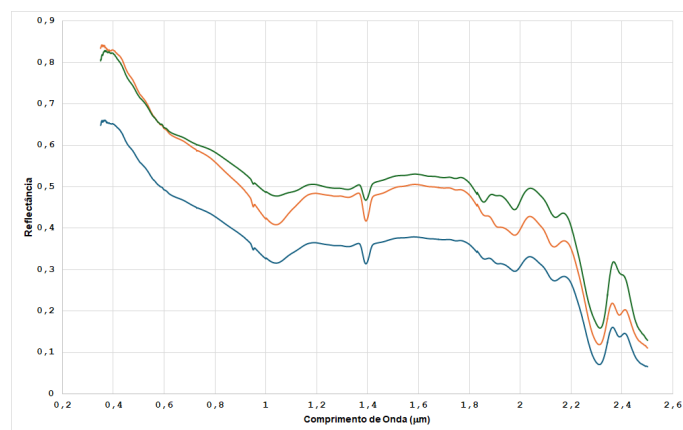


Figura 6: Assinaturas espectrais da amostra do mármore branco. Fonte: Autoria Própria.

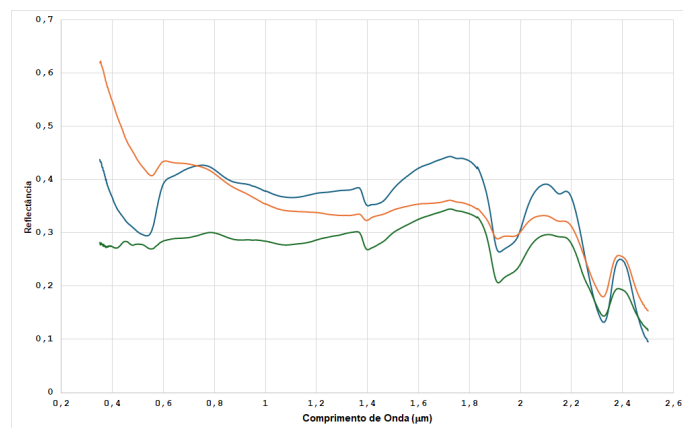


Figura 7: Assinaturas espectrais da amostra do mármore rosa. Fonte: Autoria Própria.

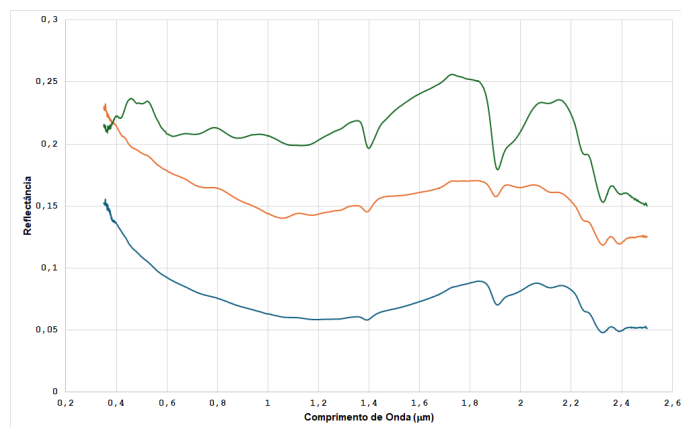


Figura 8: Assinaturas espectrais da amostra de Diabásio. Fonte: Autoria Própria.

4.2 Análise espectral e identificação mineralógica

4.2.1 Mármore Branco

A Figura 6 apresenta a assinatura espectral obtida para a amostra de mármore branco e sua comparação com as curvas de referência da calcita, dolomita e tremolita.

A curva espectral apresenta elevada reflectância ao longo de praticamente toda a faixa espectral, comportamento esperado para rochas carbonáticas. Observam-se feições de absorção bem definidas na região entre 2,30 e 2,35 μm , coincidindo com as principais bandas diagnósticas da calcita e da dolomita presentes nas bibliotecas espectrais.

Além disso, pequenas feições observadas próximas de 1,40 μm , 1,90 μm e 2,20 μm apresentam comportamento semelhante ao observado para a tremolita, indicando a influência desse mineral na resposta espectral da amostra. Essa interpretação é consistente com a caracterização mineralógica, que identificou a presença de tremolita associada aos minerais carbonáticos.

A análise das lâminas petrográficas demonstrou que a amostra de mármore branco foi a que apresentou a maior ocorrência de cristais de tremolita entre as amostras estudadas. Esse resultado reforça a interpretação das feições observadas na assinatura espectral e demonstra a capacidade da espectroscopia hiperespectral em identificar variações mineralógicas relacionadas à presença de minerais silicáticos. Esse aspecto é particularmente relevante, uma vez que um dos principais objetivos deste trabalho consiste em diferenciar zonas carbonáticas com maior enriquecimento em sílica daquelas com baixos teores desse elemento, contribuindo para a distinção entre diferentes domínios mineralógicos e fornecendo subsídios para o planejamento da lavra.

4.2.2 Mármore Rosa

A Figura 7 apresenta a assinatura espectral da amostra de mármore rosa comparada às curvas espectrais de referência. Assim como observado para o mármore branco, a assinatura espectral apresenta comportamento compatível com rochas carbonáticas, evidenciado pelas bandas de absorção concentradas principalmente na região de 2.30 a 2.35 μm , característica dos minerais calcita e dolomita.

Observa-se também uma feição de absorção na região de aproximadamente 1.90 μm , além de pequenas variações entre 2.15 e 2.25 μm , que podem estar relacionadas à presença de minerais silicáticos hidratados. Essas feições apresentam comportamento semelhante ao espectro da tremolita disponível nas bibliotecas espectrais.

Comparando-se as curvas, verifica-se boa correspondência entre as posições das bandas de absorção observadas experimentalmente e as bandas para calcita, dolomita e tremolita. As diferenças observadas na intensidade da reflectância podem ser atribuídas a fatores como granulometria, rugosidade superficial, orientação dos cristais e condições de aquisição dos espectros.

4.2.3 Diabásio

A Figura 8 apresenta a assinatura espectral obtida para a amostra de diabásio, comparada às curvas de referência dos minerais calcita, dolomita e tremolita disponíveis nas bibliotecas espectrais USGS Spectral Library e IG/UnB.

De maneira geral, observa-se que a curva espectral do diabásio apresenta comportamento distinto das curvas de referência dos minerais carbonáticos (calcita e dolomita), não evidenciando as feições de absorção mais características desses minerais, principalmente na região entre 2.30 e 2.35 μm , típica dos carbonatos.

Considerando os resultados petrográficos obtidos, observa-se que a assinatura espectral do diabásio apresenta comportamento coerente com uma rocha silicática, diferenciando-se significativamente das assinaturas espectrais dos mármore analisados, demonstrando o potencial da espectroscopia hiperespectral na distinção entre o material estéril e o minério carbonático.

4.3 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada por meio da análise de lâminas petrográficas em microscópio óptico de luz transmitida e refletida, com o objetivo de identificar os minerais de minério (calcita e dolomita) e os minerais associados ao estéril, com ênfase nos minerais silicáticos. A análise permitiu identificar a presença de calcita, dolomita e tremolita, sendo esta última o principal mineral silicatado observado nas amostras. A Figura 9 apresenta as imagens das lâminas petrográficas, nas quais é possível observar os minerais identificados

durante a análise, destacando a ocorrência de calcita, dolomita e tremolita. Essas observações forneceram suporte para a interpretação das assinaturas espectrais, permitindo relacionar as feições de absorção observadas às características mineralógicas de cada amostra.

5 Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram que a espectroscopia hiperespectral foi capaz de identificar diferenças nas assinaturas espectrais das amostras analisadas, apresentando boa correspondência com as curvas de referência das bibliotecas espectrais e com a caracterização mineralógica realizada por meio das lâminas petrográficas. A presença de minerais carbonáticos, como calcita e dolomita, bem como do mineral silicatado tremolita, pôde ser correlacionada às principais feições de absorção observadas nos espectros, evidenciando o potencial da técnica para a identificação mineralógica.

Destaca-se que a amostra de mármore branco apresentou maior ocorrência de tremolita, resultado confirmado pela análise petrográfica e refletido em sua assinatura espectral. Esse comportamento demonstra a capacidade da espectroscopia hiperespectral em reconhecer variações mineralógicas associadas ao enriquecimento em minerais silicáticos, atendendo ao objetivo proposto neste trabalho de diferenciar zonas com maiores e menores teores de sílica. Dessa forma, a técnica apresenta potencial para auxiliar na caracterização do minério, no controle de qualidade e na tomada de decisões durante o planejamento da lavra.

Como perspectiva para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação da metodologia diretamente em frentes de lavra, permitindo avaliar o desempenho da espectroscopia hiperespectral em condições reais de operação. Diferentemente do ambiente laboratorial, a aquisição de dados em campo está sujeita à influência de fatores como interferência atmosférica, umidade, presença de fraturas, diferentes graus de intemperismo, variações texturais e heterogeneidade das rochas, aspectos que podem modificar a resposta espectral dos materiais. A validação da técnica nessas condições permitirá avaliar sua robustez e sua aplicabilidade como ferramenta de apoio ao planejamento e ao controle operacional da mineração, contribuindo para a incorporação da espectroscopia hiperespectral em uma etapa na qual seu uso ainda é pouco difundido no setor de mineração.

6 Agradecimentos

Prof. Dr. Felipe Guadagnin (Universidade Federal do Pampa) e Prof. Dr. Marcos Nanni (Universidade Estadual

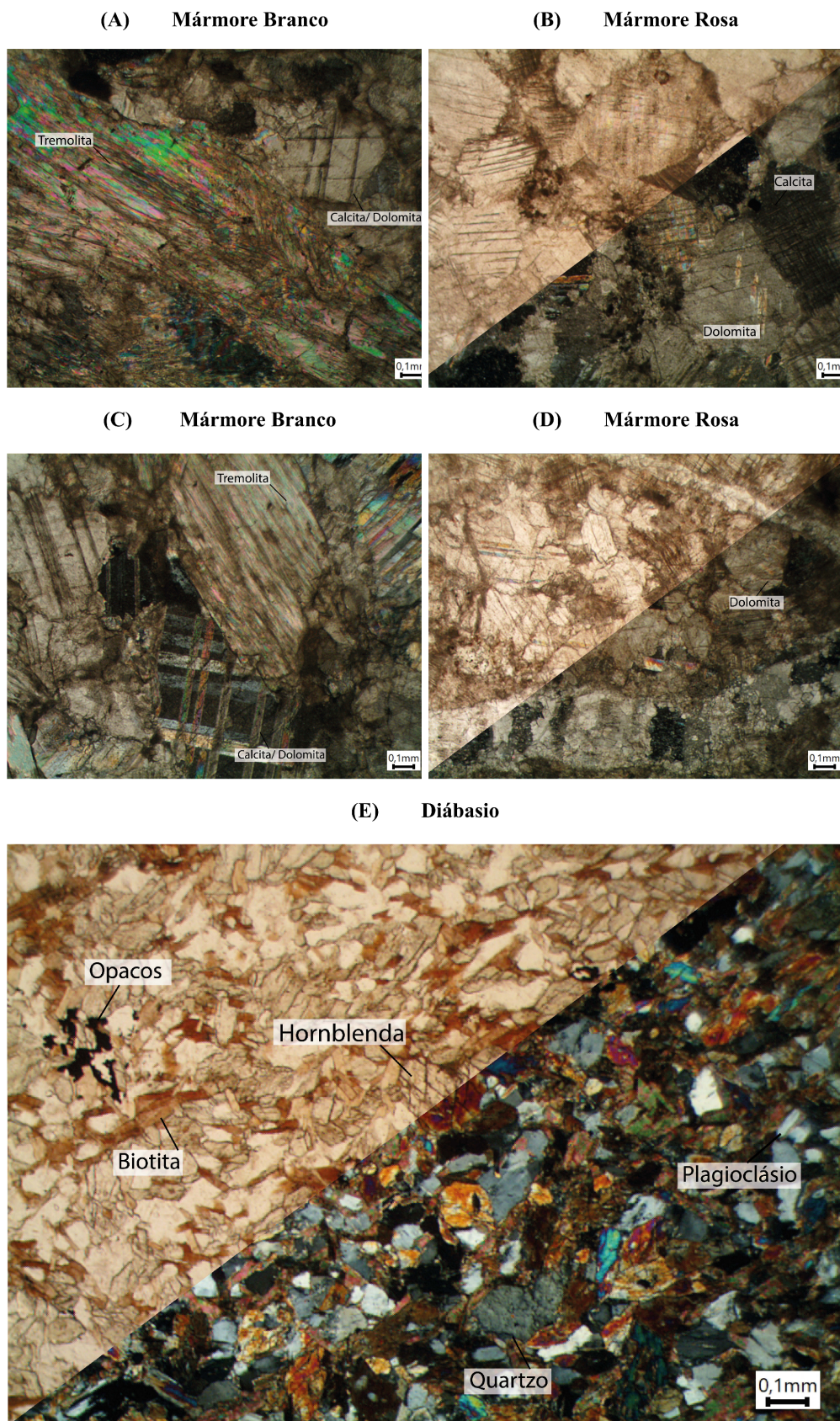


Figura 9: Lâminas utilizadas na identificação dos minerais. Fonte: Autoria Própria.

de Maringá) pelas medidas espectrais de laboratório; servidores Sissa Kumaira e Lenon Melo Ilha (Universidade Federal do Pampa) pelo apoio com a preparação de amostras e análise petrográfica.

Referências

- BAPTISTA, G. *Fundamentos de Sensoriamento Remoto*. figshare, 2021. Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.15087123>>.
- 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.
- BITENCOURT, M. *Geologia, petrologia e estrutura dos metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS*. 161 p. Tese (Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.
- BITENCOURT, M.; NARDI, L. Geologia, petrologia e geoquímica do complexo granítico de caçapava do sul, rs. *Revista Brasileira de Geociências*, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 153–169, 1989.
- BORTOLOTTI, O. J. *Petrologia dos Mármore de Caçapava do Sul, RS*. 118 p. Tese (Dissertação de Mestrado. Área de Concentração Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências USP) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.
- CRÓSTA, Á. P. et al. Sensoriamento remoto em exploração mineral no brasil. In: *Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. p. 190–207.
- FANTE, M. et al. Espectroscopia de reflectância aplicada à caracterização de materiais cimentícios suplementares e resíduos. In: FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ (UFPA). *Anais do 6º Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil*. BELÉM, PA, 2019. p. 400–410.
- HARTMANN, L.; JUNIOR, F. C. Evolução geotectônica do rio grande do sul no pré-cambriano. *50 Anos de Geologia*, Porto Alegre, p. 97–123, 2007.
- JENSEN, J. R. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- KURZ, T. H. et al. Hyperspectral image analysis of different carbonate lithologies (limestone, karst and hydrothermal dolomites): the pozalagua quarry case study (cantabria, north-west spain). *Sedimentology*, v. 59, n. 2, p. 623–645, 2012.
- LIMA, L. G. L. M. *Detecção de unidades litológicas na bacia de Una-Utinga por espectroscopia de reflectância e dados do sensor multiespectral Aster*. 125 p. Tese (Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA, FEIRA DE SANTANA, 2011.
- MENESES, P.; NETTO, J. (Ed.). *Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília; Planaltina: Editora UnB; Embrapa Cerrados, 2001. 262 p. ISBN 85-230-0656-7.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Brasília: Universidade de Brasília, 2012.
- PASETTO, G. A. *Modelagem geológica 3D utilizando aerofotogrametria com VANT em mina de mármore no município de Caçapava do Sul – RS*. 55 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), Caçapava do Sul, 2018. Curso de Geologia.
- PEDROSA, S. A. *Discriminação espectral de variações faciológicas de carbonatos por meio de espectrorradiometria e imagens ASTER na região da Serra do Ramalho – BA*. 117 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- PHILIPP, R. P.; BITENCOURT, M. F.; JUNGES, S. L. Nd isotopic study of the neoproterozoic vila nova arc, south brazil: implication for evolution of the são gabriel belt. *Journal of South American Earth Sciences*, Porto Alegre, p. 97–123, 2007.
- PLAZA, A. e. a. Recent advances in hyperspectral remote sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, v. 5, n. 4, p. 63–101, 2017.
- QUENTAL, L. et al. Multispectral and hyperspectral remote sensing as a source of knowledge in the portuguese sector of the iberian pyrite belt. *Comunicações Geológicas*, v. 107, n. Especial III, p. 21–39, 2020.
- RIBEIRO, M. et al. *Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul*. Rio de Janeiro: Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral, 1966. 232 p.
- SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. d. Calcário e dolomito. In: LUZ, A. B.; LINS, F. F.; SAMPAIO, J. A. (Ed.). *Rochas e minerais industriais: usos e especificações*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 327–350.
- SILVEIRA, M. A. C. W.; LUZ, J. A. M. Caracterização termoquímica da calcinação de calcários. In: *Anais do 63º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. Bonito, MS, Brasil: [s.n.], 2019. p. 12.