



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS**



Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

Mapeamento Espectral para Identificação de Assinaturas Espectrais dos Litotipos
Relacionados ao Depósito de Ni-Cu Sulfetado de Santa Rita, Bahia, Brasil

Esther Prates

Prof(a).Dr(a). Lucas Moreira Furlan (orientador)

Rio Claro (SP)
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro (SP)

ESTHER PRATES

MAPEAMENTO ESPECTRAL PARA IDENTIFICAÇÃO DE ASSINATURAS
ESPECTRAIS DOS LITOTIPOS RELACIONADOS AO DEPÓSITO DE NI-CU
SULFETADO DE SANTA RITA, BAHIA, BRASIL

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas-
Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do
grau de Bacharel em Geologia.

Rio Claro - SP

2024

P912m Prates, Esther

Mapeamento espectral para identificação de assinaturas espectrais dos litotipos relacionados ao Depósito de Ni-Cu Sulfetado de Santa Rita, Bahia, Brasil / Esther Prates. -- Rio Claro, 2024

81 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Lucas Moreira Furlan

1. Geociências. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Prospecção Mineral. 4. Minerais-Críticos. 5. Depósito Máfico-Ultramáfico. I. Título.

CONTRIBUIÇÕES AOS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS-ONU)

A Organização das Nações Unidas (ONU) e seus países membros, incluindo o Brasil, adotaram a Agenda Pós-2015, que visa 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esses objetivos são parte de um plano de ação global para eliminar os principais desafios que a sociedade enfrenta, com a meta de alcançá-los até 2030 (Unicef.org; Brasil.un.org).

O presente trabalho encontra-se alinhado com alguns dos ODS, sendo eles: ODS 7 - Energia Limpa e Acessível: promover a transição energética de fontes não renováveis para alternativas limpas; ODS 9 - Inovação Tecnológica: desenvolvimento de tecnologias e métodos inovadores para prospecção mineral e extração de minerais críticos impulsiona o progresso da indústria de mineração e; ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima: a prospecção e aplicação de minerais críticos contribui para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mitigando assim os efeitos das mudanças climáticas.

CONTRIBUTIONS TO THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGs-UN)

The United Nations (UN) and its member countries, including Brazil, have adopted the Post-2015 Agenda, which aims for 17 Sustainable Development Goals (SDGs). These goals are part of a global action plan to eliminate the main challenges facing society, with the goal of achieving them by 2030 (Unicef.org; Brasil.un.org).

This work is aligned with some of the SDGs, namely: SDG 7 - Clean and Affordable Energy: promote the energy transition from non-renewable sources to clean alternatives; SDG 9 - Technological Innovation: development of innovative technologies and methods for mineral exploration and extraction of critical minerals drives the progress of the mining industry; and SDG 13 - Climate Action: the exploration and application of critical minerals contributes to reducing greenhouse gas emissions, thus mitigating the effects of climate change.

ESTHER PRATES

MAPEAMENTO ESPECTRAL PARA IDENTIFICAÇÃO DE ASSINATURAS
ESPECTRAIS DOS LITOTIPOS RELACIONADOS AO DEPÓSITO DE NI-CU
SULFETADO DE SANTA RITA, BAHIA, BRASIL

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas-
Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do
grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora

Profº Drº Lucas Moreira Furlan (orientador)

Mestrando Lorenzo Tebaldi Capelane

Mestrando Otávio Passo Vieira

Rio Claro, 02 de dezembro de 2024

Documento assinado digitalmente
 ESTHER PRATES
Data: 06/12/2024 16:37:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) aluno(a)

Documento assinado digitalmente
 LUCAS MOREIRA FURLAN
Data: 06/12/2024 16:27:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) Orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Lucas Moreira Furlan pela oportunidade, por toda atenção e dedicação a mim e a este trabalho.

Agradeço a minha família por sempre acreditar em mim e me dar todo apoio que precisava, obrigada pai por todo o suporte e amor incondicional; obrigada tata por toda sabedoria e inspiração da vida, amo muito vocês. Agradeço também a família que está longe, mas sempre perto do coração, muito obriga tia Ivete por todo carinho, prima Fernanda por todas as conversas, risadas e apoio e primo Willian pela inspiração.

Agradeço ao Henrique por todo amor do mundo, apoio e principalmente por acreditar em mim quando nem eu mesma acreditava, te amo com todo meu coração.

Agradeço a toda família do Henrique, que me acolheu com muito carinho durante os 5 anos longe de casa e sempre estavam lá para me auxiliar.

Agradeço a todos os colegas que fiz durante a graduação, aqueles que seguiram outros caminhos e principalmente aqueles que ficaram comigo até o final. Muito obrigada Vanessa, Guilherme e Luisa, amo muito vocês, obrigada por tornarem minha graduação muito mais divertida e leve.

Agradeço também a minha querida amiga Gabrielle, que mesmo de longe me acompanhou em toda a jornada, amo muito você.

Agradeço a Bianca, por toda paciência, compreensão e empatia nesta reta final, sem você esse trabalho não poderia ser concluído.

Agradeço ao Gepeto, por todos os conselhos e ajudas ao decorrer dessa graduação, valeu gege.

Por último, mas não menos importante, também agradeço a todos os civis, médicos e enfermeiras que cuidaram de mim no pequeno acidente que atrasou um pouco a conclusão deste ciclo.

“The best journeys are always unexpected”
-The Hobbit.

RESUMO

A prospecção de novos depósitos minerais enfrenta crescentes desafios devido à descoberta dos depósitos superficiais e à maior dificuldade em localizar aqueles em profundidades maiores. Além disso, depósitos já explorados apresentam limitações para expansão, tornando indispensável o uso de tecnologias avançadas e abordagens inovadoras na prospecção mineral. Este trabalho busca colaborar com a exploração mineral ao desenvolver uma biblioteca espectral específica para o depósito de Santa Rita, na Bahia, utilizando dados dos satélites CBERS-4A, Landsat 8 e Sentinel-2. Técnicas de Sensoriamento Remoto foram aplicadas para criar composições RGB, histogramas e perfis espectrais da área, com o auxílio dos softwares QGIS e ArcGIS Pro. As assinaturas espectrais de cada litotipo do depósito mostraram boas comparações, identificando características potenciais para guias prospectivos de sulfetos e lateritas de níquel. Os dados dos satélites Landsat 8 e Sentinel-2 apresentaram alta concordância, reforçando a confiabilidade dos resultados. Já o CBERS-4A apresentou maior divergência, mas ainda forneceu resultados positivos, ampliando as possibilidades de análise espectral e estabelecendo novas fronteiras de conhecimento para a identificação de litotipos.

Palavras-chave: Geociências; Sensoriamento Remoto; Prospecção Mineral; Minerais-Críticos; Depósito Máfico-Ultramáfico.

ABSTRACT

The search for new mineral deposits faces increasing challenges, as most surface-level deposits have already been discovered, and locating deeper ones requires advanced techniques. Additionally, expanding already-explored areas often encounters limitations, highlighting the need for innovative technologies and approaches to enhance mineral prospecting success. This study aims to support mineral exploration by developing a spectral library for the Santa Rita deposit in Bahia, Brazil, using data from CBERS-4A, Landsat 8, and Sentinel-2 satellites. Remote Sensing techniques were employed to generate RGB composites, histograms, and spectral profiles of the area, utilizing QGIS and ArcGIS Pro software. Spectral signatures for each lithotype in the deposit revealed strong correlations and distinct features that could serve as prospective guides for nickel sulfides and laterites. Data from Landsat 8 and Sentinel-2 showed high consistency, confirming the reliability of the results, while CBERS-4A presented more variability but still yielded positive outcomes. This expanded the analytical potential of CBERS-4A and contributed to advancing knowledge on lithotype identification.

Keywords: Geosciences; Remote Sensing; Mineral Exploration; Critical Minerals; Mafic-Ultramafic Deposits.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Figura de localização da área de estudo.....	20
Figura 2. Posições relativas dos blocos arqueanos anteriores à colisão paleoproterozóica, mostrando as localizações das bacias paleoproterozóicas Contendas e Jacobina.	23
Figura 3. Posições dos blocos Arqueanos após o Ciclo Transamazônico Paleoproterozoico.	24
Figura 4. Reconstruções geotectônicas E–W de SSE–SSW Bahia, mostrando as posições das unidades rochosas do Paleoproterozóico. Diagrama superior, fase anterior; diagrama inferior, situação atual. Caminhos P–T–t esquemáticos e os prováveis locais de deposição de depósitos minerais são mostrados.	25
Figura 5. Modelo de sistemas de formação de minérios de sulfeto de Ni-Cu-EGP. SCLM A e SCLM B representam blocos separados de manto litosférico subcontinental empobrecido.	26
Figura 6. Modelo de sistema magmático da formação de minérios de sulfeto de Ni-Cu-EGP.	28
Figura 7. Geologia da intrusão Fazenda Mirabela.	29
Figura 8. Fluxograma de trabalho.	31
Figura 9. Especificações técnicas de cada uma das bandas espectrais dos satélites que serão utilizados.	34
Figura 10. Exemplo de associação de bandas com seus filtros de cor para composição de bandas coloridas.....	37
Figura 11. Histogramas RGB para o litotipo gabronorito.	40
Figura 12. Histogramas RGB para o litotipo websterito.	41
Figura 13. Histogramas RGB para o litotipo ortopiroxenito.....	42
Figura 14. Histogramas RGB para o litotipo olivina-ortopiroxenito.	43
Figura 15. Histogramas RGB para o litotipo harzburgito.	44
Figura 16. Histogramas RGB para o litotipo dunito.	45
Figura 17. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite CBERS-4A das imagens antigas.	46
Figura 18. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite CBERS-4A das imagens recentes.....	46
Figura 19. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.....	47
Figura 20. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.....	47
Figura 21. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite Sentinel-2 das imagens antigas.....	48
Figura 22. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite Sentinel-2 das imagens recentes.....	48
Figura 23. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite CBERS-4A das imagens antigas.....	49
Figura 24. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite CBERS-4A das imagens recentes.....	50
Figura 25. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.	50
Figura 26. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.....	51

Figura 27. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.....	51
Figura 28. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.....	52
Figura 29. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Cbers-4A das imagens antigas.....	53
Figura 30. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Cbers-4A das imagens recentes.....	54
Figura 31. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.....	55
Figura 32. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.....	55
Figura 33. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.....	56
Figura 34. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.....	57
Figura 35. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Cbers-4A das imagens antigas.....	57
Figura 36. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Cbers-4A das imagens recentes.	58
Figura 37. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.....	58
Figura 38. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.	59
Figura 39. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.....	59
Figura 40. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.	60
Figura 41. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Cbers-4A das imagens antigas.	61
Figura 42. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Cbers-4A das imagens recentes.....	61
Figura 43. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.....	62
Figura 44. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.....	62
Figura 45. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.....	63
Figura 46. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.....	63
Figura 47. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Cbers-4A das imagens antigas. ...	64
Figura 48. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Cbers-4A das imagens recentes. .	64
Figura 49. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Landsat 8 das imagens antigas. ...	65
Figura 50. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Landsat 8 das imagens recentes..	65
Figura 51. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Sentinel 2 das imagens antigas....	66
Figura 52. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes..	66
Figura 53. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Cbers-4A das imagens antigas.....	67

Figura 54. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Cbers-4A das imagens recentes.	68
Figura 55. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Landsat 8 das imagens antigas.....	69
Figura 56. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Landsat 8 das imagens recentes.	69
Figura 57. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.....	70
Figura 58. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.	70
Figura 59. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Cbers-4A das imagens antigas.....	71
Figura 60. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Cbers-4A das imagens recentes.	71
Figura 61. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Landsat 8 das imagens antigas.....	72
Figura 62. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Landsat 8 das imagens recentes.	73
Figura 63. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.....	73
Figura 64. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.	74

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1. Dados de aquisição de imagem.	32
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS	19
3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
3.1 Fisiografia.....	20
3.2 Histórico da mina Santa Rita	21
4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	23
5. GEOLOGIA LOCAL	26
5.1 Metalogênese dos depósitos de Ni-Cu-EGP magmático sulfetado.....	26
6. MATERIAIS E MÉTODOS	31
6.1 Levantamento bibliográfico.....	31
6.2 Geração de mapas e <i>shapefiles</i> preliminares.....	32
6.3 Aquisição de dados orbitais.....	32
6.3.1 CBERS-04A.....	33
6.3.2 Sentinel-2.....	33
6.3.3 Landsat 8	33
6.4 Correção e pré-processamento dos dados.....	34
6.5 Processamento dos dados	36
6.5.1 <i>Layerstack</i>	36
6.5.2 Composição de bandas	37
6.6 Análises espectrais	37
6.6.1 Histogramas.....	37
6.6.2 Perfis espectrais	38
6.7 Produção de imagens e textos	38
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
7.1 Análise preliminar das imagens CBERS-04A	39
7.1.1 Análise dos histogramas do litotipo Gabronorito	39
7.1.2 Análise dos histogramas do litotipo Websterito	40
7.1.3 Análise dos histogramas do litotipo Ortopiroxenito.....	41
7.1.4 Análise dos histogramas do litotipo Olivina Ortopiroxenito	42
7.1.5 Análise dos histogramas do litotipo Harzburgito.....	43
7.1.6 Análise dos histogramas do litotipo Dunito.....	44
7.2 Perfis Espectrais	45
7.2.1 Perfis Espectrais do Gabronorito	45

7.2.2 Perfis Espectrais Websterito	49
7.2.3 Perfis Espectrais Ortopiroxenito.....	52
7.2.4 Perfis Espectrais Olivina Ortopiroxenito	57
7.2.5 Perfis Espectrais Harzburgito.....	60
7.2.6 Perfis Espectrais Dunito.....	64
7.2.7 Perfis Espectrais Mineralização de Sulfeto de Ni	67
7.2.8 Perfis Espectrais Mineralização de Laterita de Ni	71
8. CONCLUSÕES.....	75
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

A vasta diversidade geológica do Brasil promove acúmulos minerais de diferentes formas, desde depósitos primários a secundários (Marini *et al.*, 2016). Muitos destes depósitos são necessários para o desenvolvimento de diversas atividades econômicas, tanto globais quanto nacionais, o que inclui a transição energética que vem sendo implantada e cada vez mais desenvolvida para a substituição de componentes fósseis e outros não renováveis para fontes alternativas limpas (Castro, *et al.*, 2022). Minerais como níquel (Ni), cobre (Cu), ouro (Au), prata (Ag), elementos terras raras (ETR), elementos do grupo da platina (EGPs) e outros são exemplos desses minerais que se fazem importantes na troca de fontes energéticas poluidoras para fontes renováveis.

A transição energética é dependente de tecnologias que necessitam de minerais críticos para serem desenvolvidas e aplicadas, os quais apresentam algumas dificuldades nas diferentes etapas da atividade mineradora, sobretudo devido a limitações e dificuldade na prospecção de novos depósitos, e questões tecnológicas na extração e beneficiamento (EC, 2020a; IRTC, 2020). Além disso, podem ocorrer danos ambientais e conflitos sociais durante sua exploração.

Para que a atividade mineradora venha a se desenvolver de forma adequada, uma das primeiras etapas é a necessidade de definir a região de interesse, a qual tenha indícios minerais que poderiam levar a um depósito passível de produção mineral. A partir da região escolhida, a prospecção mineral visa um reconhecimento regional preliminar e consequente apuração de alvos, seguindo para um maior detalhamento se os indícios de mineralização forem favoráveis (Menezes *et al.*, 2006).

No Brasil, o Estado da Bahia compreende inúmeros empreendimentos mineiros, processos de explorações e pesquisas devido a sua geologia favorável e diversificada que possibilita uma alta disponibilidade de recursos. Grande porção territorial do Estado é localizado no Cráton do São Francisco, além de vastas exposições de terrenos arqueanos e paleoproterozoicos, e bacias sedimentares (Almeida, 1977). O ambiente geológico e geotectônico contribuem para diferentes tipos de mineralizações, como por exemplo os minerais críticos Ni e Cu com EGP associados.

O níquel é um metal de transição, que possui os principais usos voltados para indústria, baterias, transporte e aeronaves, turbinas eólicas, robótica, células de combustível, motores de tração elétrica, entre outros, além de aplicações na construção civil. É muito utilizado para ligas metálicas como aço inoxidável (Fe+Ni), monel (Ni+Cu), inconel (Ni+Cr), nicromo (Ni+Cr+Fe) e superligas de níquel, devida suas resistências à oxidação, corrosão e mecânica (Marini *et al.*, 2016). O Brasil se encontra entre um dos maiores produtores mundiais, com cerca de 6,2% das reservas globais (IBRAM, 2012) e grande parte de sua produção é destinada à exportação.

Uma das maiores produtoras de Ni no Brasil é a mineradora Atlantic Nickel, que administra a Mina de Santa Rita na porção sudeste da Bahia, no município de Itagibá, a qual será a área de estudo abordada neste trabalho. O minério provém, principalmente, de um depósito primário sulfetado, que se encontra associado ao complexo máfico-ultramáfico da Fazenda Mirabela (Ferreira Filho, *et al.*, 2013; Barnes *et al.*, 2011), uma intrusão paleoproterozoica (2.5 - 1.6Ga). O Complexo Mirabela está inserido no leste do Cráton do São Francisco, hospedado em rochas arqueanas na porção sul do Cinturão Itabuna (Lazarin, 2012).

A busca por novos depósitos enfrenta cada vez mais dificuldades, já que grande parte daqueles que afloram em superfície já foram descobertos e conforme sua profundidade aumenta, maior é o desafio de encontrá-los. Ademais, os depósitos e áreas já exploradas também possuem problemas de expansão, fazendo necessário o uso de novas tecnologias e abordagens para auxiliar e aumentar as chances da prospecção de novas reservas minerais.

O uso de novas técnicas de prospecção e pesquisa são fundamentais para que mais mineralizações possam ser encontradas, exploradas e expandidas, visando a definição mais assertiva de regiões e alvos com interesse econômico. Com isso, diversas ferramentas podem ser utilizadas na investigação inicial, a fim de restringir a área a ser explorada.

A Espectroscopia de Reflectância (ER) é uma técnica amplamente utilizada na indústria mineral, aplicada principalmente em prospecções regionais para identificar assinaturas espectrais específicas relacionadas com ocorrências minerais. A partir do estudo da interação entre a energia eletromagnética em comprimentos de onda específicos e a superfície dos materiais, a ER permite a identificação de uma ampla gama de minerais e algumas de suas propriedades físico-químicas, de forma rápida, não destrutiva e operacionalmente simples. O Sensoriamento Remoto Espectral utiliza

os pressupostos teóricos da ER para identificar e mapear materiais através de imagens adquiridas por satélites ou drones, seguido pelo processamento e classificação dessas imagens. Isso permite a extração de assinaturas espectrais com alto nível de detalhe em cada um dos pixels que as compõem.

2. OBJETIVOS

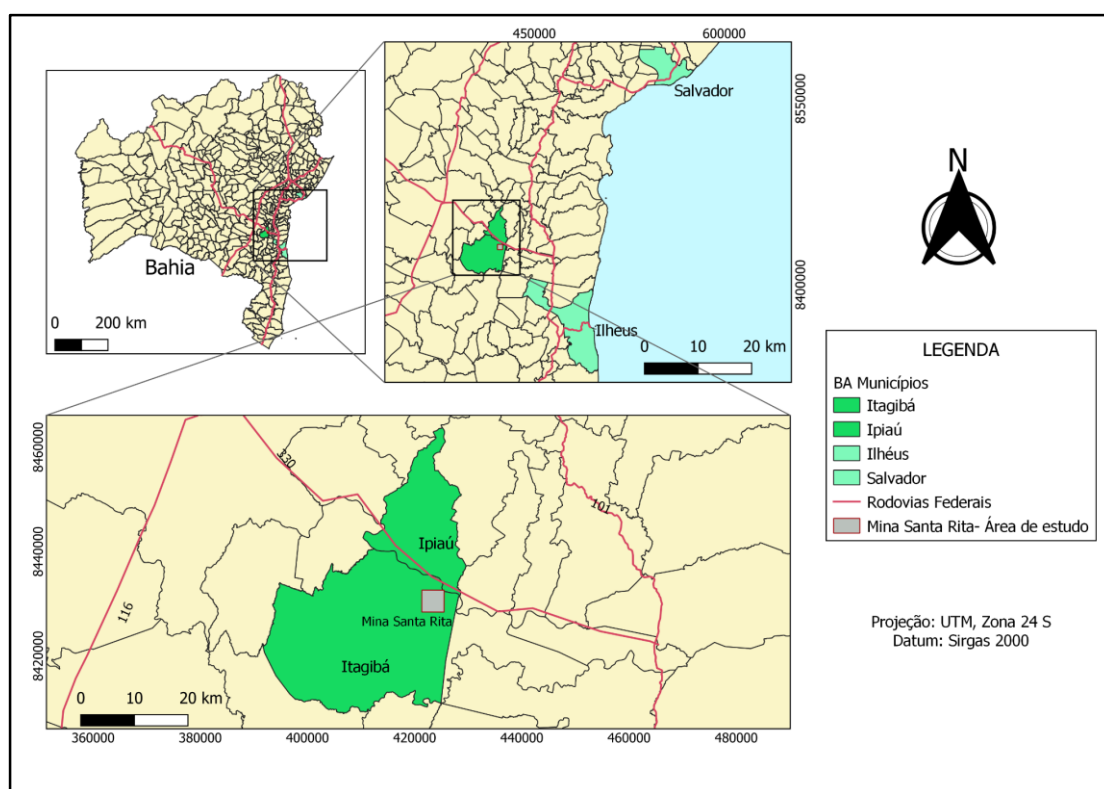
O objetivo deste trabalho é o mapeamento multi-satelital espectral do complexo máfico-ultramáfico da Fazenda Mirabela, em Itagibá no estado da Bahia, para que se possa caracterizar as assinaturas espectrais de cada litotipo já mapeado. O projeto visa a geração de uma biblioteca espectral específica para o depósito a fim de colaborar com a pesquisa mineral, facilitando a busca por novos depósitos e otimizando recursos para melhor direcionar a prospecção de níquel.

3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O depósito de Santa Rita se localiza no município de Itagibá, sudeste do Estado da Bahia (Figura 1), a 6 km da cidade de Ipiaú. O seu acesso pode ser feito através de Ilhéus, totalizando 145 km, seguindo pela Av. Ubaitaba, seguindo para BA-262, Rodovia Governador Mário Covas (BA-120) até Ipiaú, acessando a Av. Tancredo Neves até chegar à estrada da Atlantic Nickel.

A área de estudo possui cerca de 17,6 km² e está entre as coordenadas 421275 E 8432946 S; 425434 E 8428742 S; 425434 E 8432946 S; 421275 E 8428742 S- Datum SIRGAS 2000 zona 24S.

Figura 1. Figura de localização da área de estudo.



Fonte: IBGE (2022), ANA (2016). Elaborado pela autora (2024)

3.1 Fisiografia

O clima do município de Itagibá é caracterizado como tropical de altitude, com verões muito quentes e longos, invernos curtos e abafados. As temperaturas anuais variam de 17°C a 31°C (*Weather Spark*, 2016). O período de maior precipitação é entre novembro a julho, enquanto os períodos de estiagem são de agosto a setembro.

A vegetação é de floresta tropical (Mata Atlântica), caracterizada por densa cobertura florestal e grande diversidade de espécies, e a hidrografia do município é formada pelo Rio de Contas e seus afluentes. Apresenta topografia pouco variada, com altitudes entre 350-450 m, o que caracteriza um relevo plano a pouco ondulado (Lazarin, 2012).

3.2 Histórico da mina Santa Rita

Existem três depósitos de níquel sulfetado no Brasil, são eles: Americano do Brasil em Goiás, Fortaleza de Minas em Minas Gerais e o depósito de Santa Rita, na Bahia, sendo este último a área contemplada neste trabalho. O depósito de Santa Rita é caracterizado pela intrusão máfica-ultramáfica Fazenda Mirabela.

A intrusão Fazenda Mirabela possui 2,5 km de largura por 4,2 km de comprimento e o Depósito de Santa Rita se localiza na zona intermediária da intrusão. Sua mineralização é uma camada estratiforme contínua com 0,5-5% em peso de sulfetos magmáticos de Fe-Ni-Cu disseminados (Ferreira Filho *et al.*, 2013). O depósito possui características incomuns, já que possui particularidades em relação a depósitos convencionais de sulfetos de Ni-Cu mas também de depósitos de EGP do tipo *offset* (Ferreira Filho *et al.*, 2013) – depósitos provavelmente formados durante deformação e remobilização de EGP e sulfetos.

A descoberta do complexo intrusivo máfico-ultramáfico ocorreu em 1976, através de levantamentos aeromagnéticos da então Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), na região sul da Bahia. A exploração avançou nos anos seguintes, entre 1979 e 1981, com as pesquisas iniciadas pela Mineração Nhambu, uma *joint venture* que elaborou um programa de exploração mineral na região para metais básicos e preciosos, especificamente ouro e cromo (Neto, 2009), envolvendo, primeiramente, sedimentos de corrente e programa de amostragem de solo, seguido por levantamentos geofísicos terrestres e geoquímicos, além de mapeamento geológico e dois furos diamantados.

Posteriormente, durante os anos de 1985 a 1989, A Caraíba Metais S.A. atuou na região para explorar cobre, níquel e EGPs. Foram executados pela empresa mapeamento geológico detalhado, geoquímica de solos, levantamentos geofísicos e cinco perfurações diamantadas (Ferreira Filho *et al.*, 2013).

Durante os anos de 1989 e 2002 as áreas de Mirabela e Palestina - sendo esta última uma segunda intrusão máfica-ultramáfica identificada na região - foram reivindicadas pela Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), criando o "*Projeto Verificações Minerais no Estado da Bahia, Prospecto Fazenda Mirabela*" (Cunha et al., 1998), efetuando uma reavaliação dos trabalhos de exploração anteriores através de mapeamento geológico detalhado, perfis de geofísica do solo e medições de densidade e suscetibilidade magnética para as sondagens precedentes. Além disso, em 1998 a CBPM realizou levantamentos magnéticos aéreos e *QuesTEM*, com levantamentos geofísicos terrestres magnéticos, eletromagnéticos e de polarização induzida (Ferreira Filho et al., 2013).

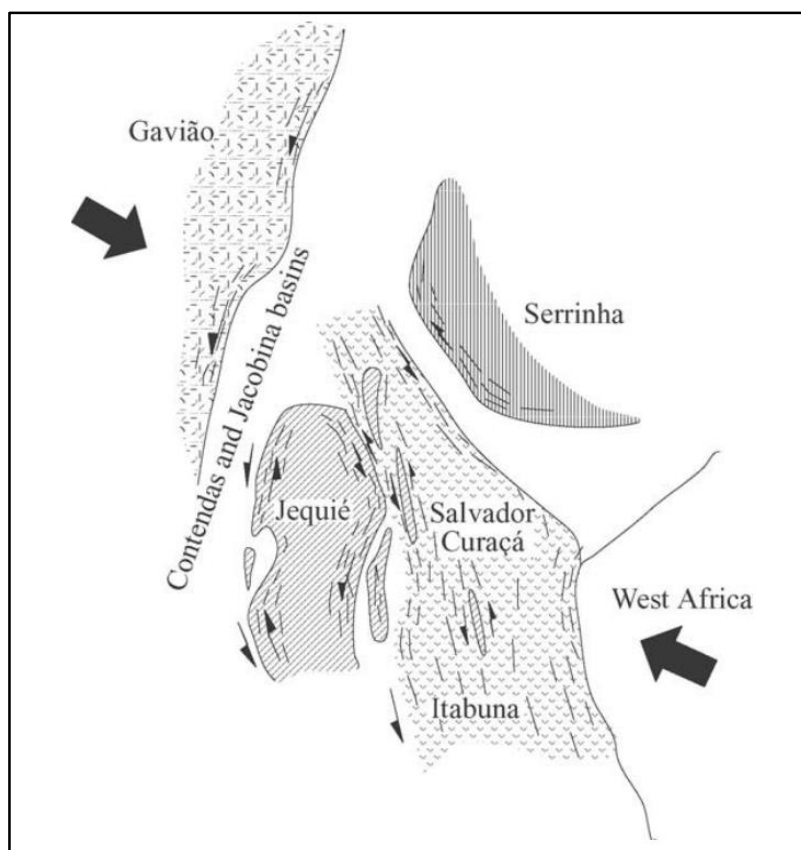
Em 2003, a Mirabela Mineração do Brasil Ltda., assumiu o Projeto Níquel de Itagibá, dando início aos trabalhos de pesquisa complementar. O programa de perfuração diamantada começou em 2004 e em setembro de 2009 foi iniciada a produção da mina a céu aberto Santa Rita.

Em 2018 a Mirabela Mineração do Brasil Ltda. foi adquirida pela Appian Capital Advisory LLP (appiancapitaladvisory.com), através de um procedimento de recuperação judicial, surgindo assim a Atlantic Nickel, retomando as atividades paralisadas em 2016 e retomadas no final de 2019 (IBRAM, 2019), que seguem ativas até os dias de hoje. A Mina Santa Rita é uma mineração que opera a céu aberto, onde é produzido o concentrado de níquel e possui recursos medidos e indicados de 59.173 Mt a 0,33 NiS e 0,11% Cu (atlanticnickel.com).

4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Estado da Bahia é localizado majoritariamente no Cráton do São Francisco, o qual possui quatro segmentos crustais arqueanos, sendo eles: Gavião, Itabuna-Salvador-Curaçá, Jequié e Serrinha (Figuras 2 e 3), que durante o período paleoproterozoico (2.5-1.8 Ga) colidiram no sentido NW-SE e resultaram na formação do Cráton São Francisco-Congo (Alves da Silva & Barbosa 1997; Barbosa & Sabaté, 2003). Segundo Almeida (1977), o cráton é definido como uma unidade estabilizada do final do evento orogênico do paleoproterozoico e durante o mesoproterozoico (1.6-1.0 Ga) dividiu-se, formando o Oceano Atlântico.

Figura 2. Posições relativas dos blocos arqueanos anteriores à colisão paleoproterozóica, mostrando as localizações das bacias paleoproterozóicas Contendas e Jacobina.



Fonte: Barbosa & Sabaté, 2004.

O segmento Gavião, localizado na porção oeste-sudoeste, é caracterizado por TTGs divididos em dois grupos, sendo os dois metamorfizados na fácies anfibolito e datados a partir de U-Pb SHRIMP em zircões. O primeiro com idades entre 3,4-3,2 Ga (Martin *et al.*, 1991), originado pela fusão de basaltos toleíticos, resultando em anfibolitos com granadas ou eclogitos como resíduos. O segundo possui idades entre

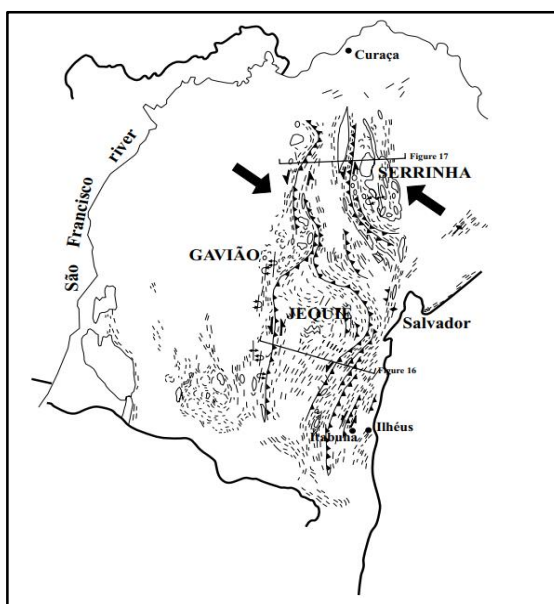
3,2-3,1 Ga e teve origem semelhante, porém houve contaminação crustal (Martin *et al.*, 1991; Cunha *et al.*, 1996), além disso possui uma sequência de vulcano-sedimentares, caracterizados por *greenstone belts* da fácies xisto verde (Marinho, 1991).

Já o segmento Itabuna-Salvador-Curaçá, é o bloco exposto mais jovem e se estende do sudeste e bifurca para nordeste e noroeste. Possui tonalitos/trondhjemitos, além de corpos de charnockitos, gabros/basaltos de fundo oceânico (Teixeira, 1997; Barbosa & Sabaté, 2003). Sua orogenia foi dada a partir da colisão entre os blocos Serrinha, Gavião e Jequié, entre 2.15 e 2.10 Ga (Silva *et al.*, 1997; Barbosa *et al.*, 2003).

O segmento Jequié é localizado na porção sul-sudoeste da Bahia, com migmatitos de idades mais antigas (3,0-2,9 Ga; Marinho, 1994) e intrusões mais jovens (2,8-2,7 Ga; Alibert & Barbosa 1992) de granitos-granodioritos. Suas rochas foram profundamente deformadas e equilibradas na fácies granulito, durante a colisão paleoproterozoica (2.15 e 2.10 Ga; Barbosa & Sabaté, 2003).

Por último, o segmento Serrinha ocorre na porção nordeste do Estado, com formação de crosta composta de ortognaisses graníticos-granodioríticos e tonalíticos de idades 3,1-2,8 Ga (Mello *et al.* 2000; Rios, 2002), marcadas por fácies anfibolito. Constituem o embasamento dos *Greenstone Belts* do Rio Itapicuru e do Rio Capim, ambos do Paleoproterozoico.

Figura 3. Posições dos blocos Arqueanos após o Ciclo Transamazônico Paleoproterozoico.

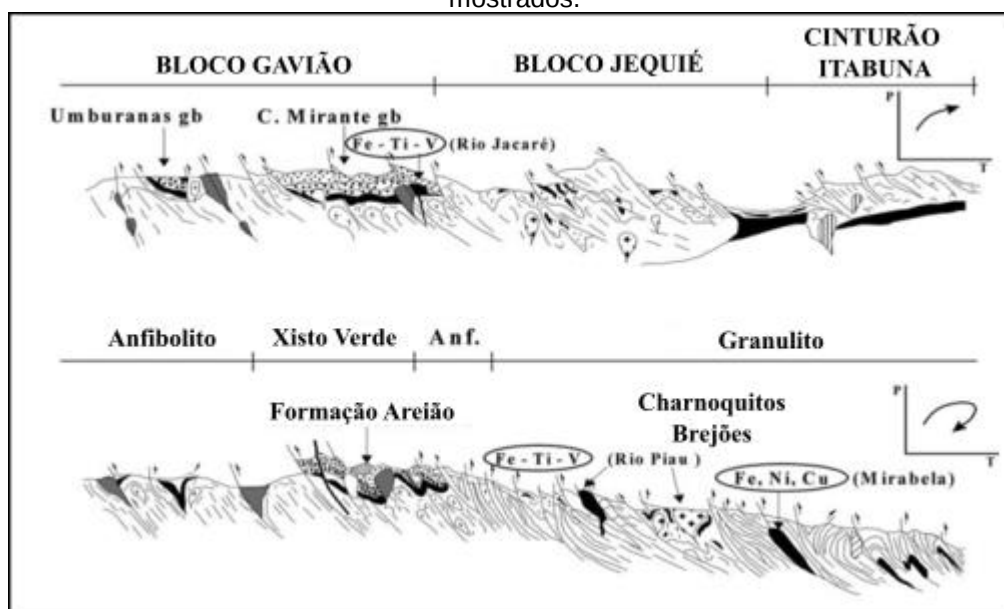


Fonte: Barbosa & Sabaté, 2004.

A área de estudo situa-se na porção oeste do segmento Itabuna-Salvador-Curaçá (SISC), onde surgiram as intrusões máficas-ultramáficas Fazenda Mirabela e Palestina (Figura 4), a partir da última transpressão da orogenia paleoproterozoica, encaixada em uma zona de cisalhamento, com direção NNE e predominância na porção central da área. As intrusões se caracterizam por dunitos, peridotitos, piroxenitos e gabros (Abram & Silva, 1992; Barbosa, 1990), e estão deformadas e parcialmente reequilibradas na fácies granulito.

Segundo Silva *et al.* (1996), a intrusão de Mirabela possui 2,2 Ga, pelo método Sm-Nd, mas devido a contaminação crustal, a idade é considerada como máxima. Há camadas de mineralizações de Fe-Ni-Cu, além de EGP na transição peridotito-piroxenito (Barbosa & Sabaté, 2004).

Figura 4. Reconstruções geotectônicas E–W de SSE–SSW Bahia, mostrando as posições das unidades rochosas do Paleoproterozóico. Diagrama superior, fase anterior; diagrama inferior, situação atual. Caminhos P–T–t esquemáticos e os prováveis locais de deposição de depósitos minerais são mostrados.



Fonte: Barbosa & Sabaté, 2004. Traduzido pela autora (2024).

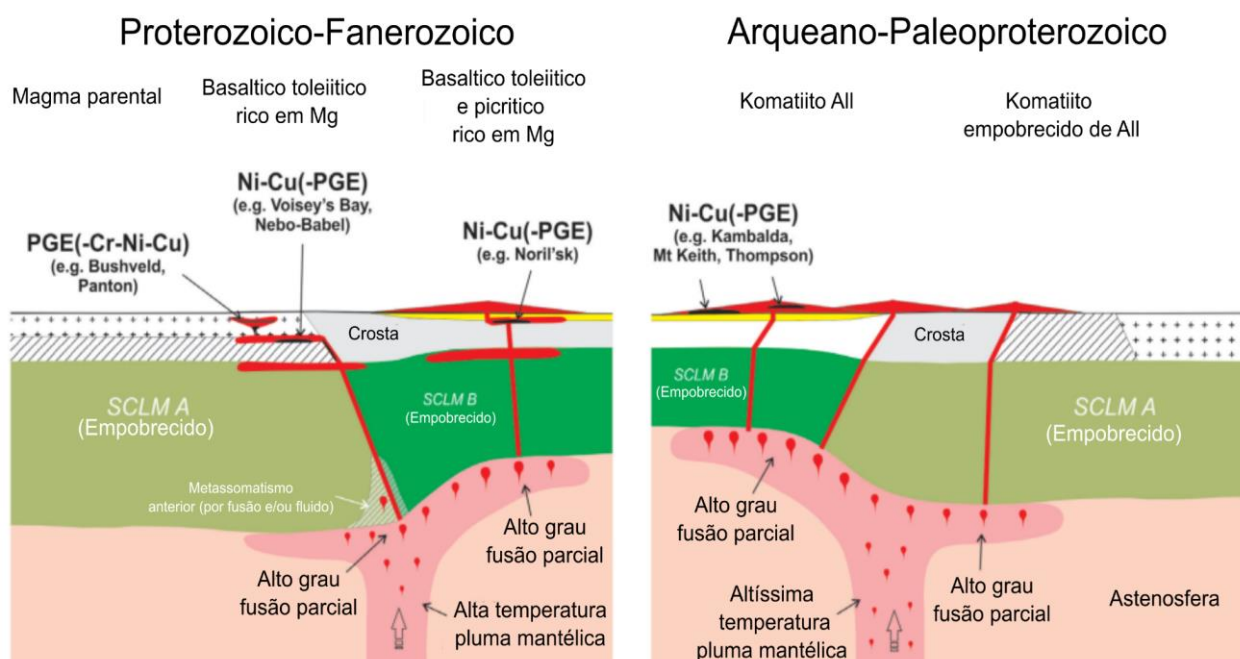
5. GEOLOGIA LOCAL

5.1 Metalogênese dos depósitos de Ni-Cu-EGP magmático sulfetado

Os depósitos são formados a partir de magmas máficos-ultramáficos enriquecidos de sulfetos de Ni-Cu-EGP, geralmente em margens de antigos crátons arqueanos, associados a intrusões menores com grande volume de magma. Sua gênese está relacionada com o tempo da fonte, dos fluidos, do transporte e das armadilhas (Naldrett, 2004; Barnes *et al.*, 2016).

Eles podem ser classificados em dois tipos principais, os komatiíticos e os máficos-ultramáficos (Figura 5). O primeiro é caracterizado por magmas ultramáficos, ricos em Ni-Mg, encontrados em *greenstones belts* do Arqueano (Keays, 1995), enquanto o segundo é caracterizado por magmas máfico-ultramáficos, de composição intermediária, encontrados em *greenstone belts* do Proterozoico (Naldrett, 2004).

Figura 5. Modelo de sistemas de formação de minérios de sulfeto de Ni-Cu-EGP. SCLM A e SCLM B representam blocos separados de manto litosférico subcontinental empobrecido.



Fonte: Dulfer *et al.*, 2016. Traduzido pela autora (2024).

Seus principais aspectos incluem a fonte magmática, o mecanismo de formação, a rocha hospedeira, forma do depósito e mineralogia, além da migração do magma e dos fluidos sulfetados, bem como a segregação e acumulação dos sulfetos (Lasher & Keays, 2002; Naldrett, 2004; Barnes & Lightfoot, 2005; Barnes *et al.*, 2016).

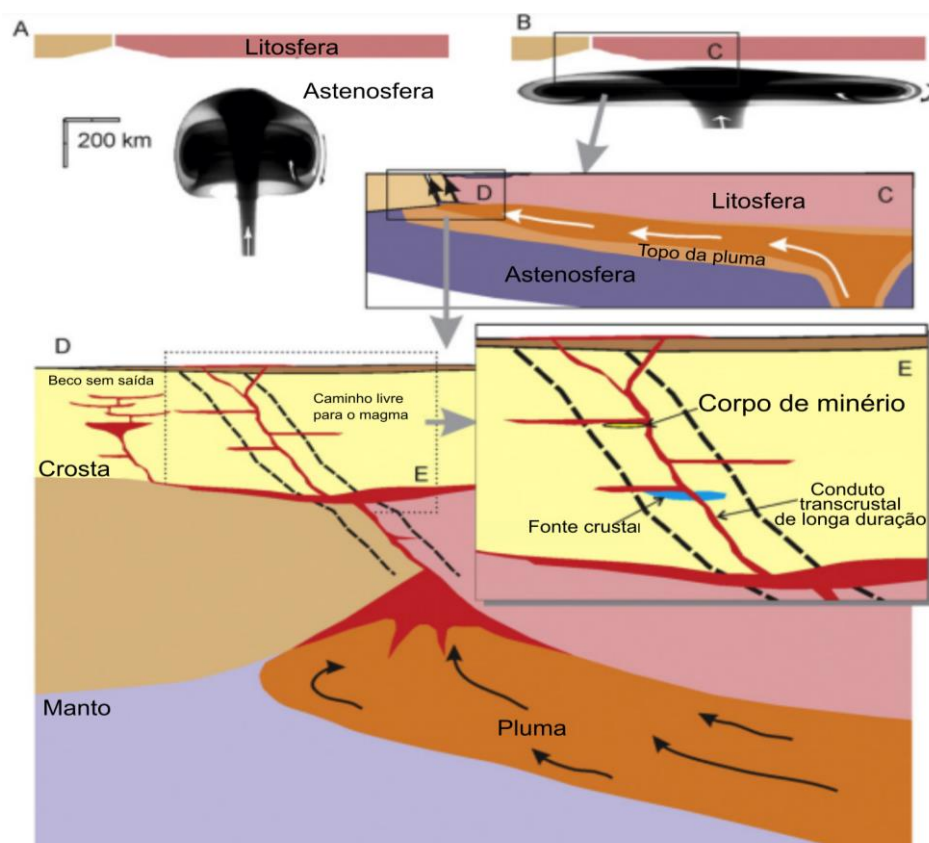
Os magmas que formam esses depósitos são derivados do manto (Figura 6), especialmente em regiões associadas a plumas mantélicas ou zonas de extensão tectônica (Naldrett, 2004). Esses magmas possuem alta taxa de fusão parcial, o que resulta em líquidos magmáticos ricos em metais compatíveis com sulfetos (Ni, Cu e EGP) (Barnes *et al.*, 2016; Fiorentini *et al.*, 2017).

Durante sua ascensão, pode ocorrer a mistura do magma com outras massas magmáticas, além de incorporar materiais crustais, aumentando a sua complexidade química, proporcionando a saturação em enxofre, que é essencial para a segregação dos sulfetos. Os sulfetos são formados pela cristalização fracionada do magma, conforme o magma esfria, os sulfetos se cristalizam e se acumulam no fundo da câmara magmática, que é uma área de baixa energia, que permite a deposição e concentração eficiente dos metais (Campbell & Barnes, 1984; Barnes *et al.*, 2016 e 2017; Le Vaillant *et al.*, 2018).

As armadilhas dos líquidos sulfetados podem incluir estruturas geológicas como intrusões máficas-ultramáficas, falhas e zonas de cisalhamento, que servem para acumulação e concentração desses líquidos, auxiliando na gênese dos metais. Ademais, processos metamórficos e hidrotermais podem modificar a mineralização original, resultando na redistribuição de metais e alteração das características do depósito (Le Vaillant *et al.*, 2016).

Os depósitos podem assumir uma variedade de formas, incluindo veios, disseminações e corpos massivos (Naldrett, 2004). E os minerais sulfetados mais comuns são pirrotita, pentlandita e calcopirita, enquanto os minerais de EGP geralmente ocorrem como inclusões nos minerais de sulfetos (Barnes & Lightfoot, 2005).

Figura 6. Modelo de sistema magmático da formação de minérios de sulfeto de Ni-Cu-EGP.



*(A) Pluma inicial subindo sob um cráton arqueano, a poucas centenas de quilômetros de um limite original do cráton. (B) Impacto e achatamento do topo da pluma sob a litosfera. (C) Canalização do topo e da cauda da pluma para a litosfera mais fina na margem do cráton, geração de rifteamento continental centrado na sutura original e início da produção de derretimentos com alto teor de Mg e baixo teor de Ti. (D) Desenvolvimento de ambientes favoráveis e desfavoráveis para mineralização acima da zona de fusão, mostrando a combinação de estrutura de extração do manto de longa duração e alta produção de magma, dando origem a "rodovias de magma" de alto fluxo com potencial para assimilação de crustal, transporte e deposição de minérios de sulfetos magmáticos.

Fonte: Barnes *et al.*, 2016. Traduzido pela autora (2024).

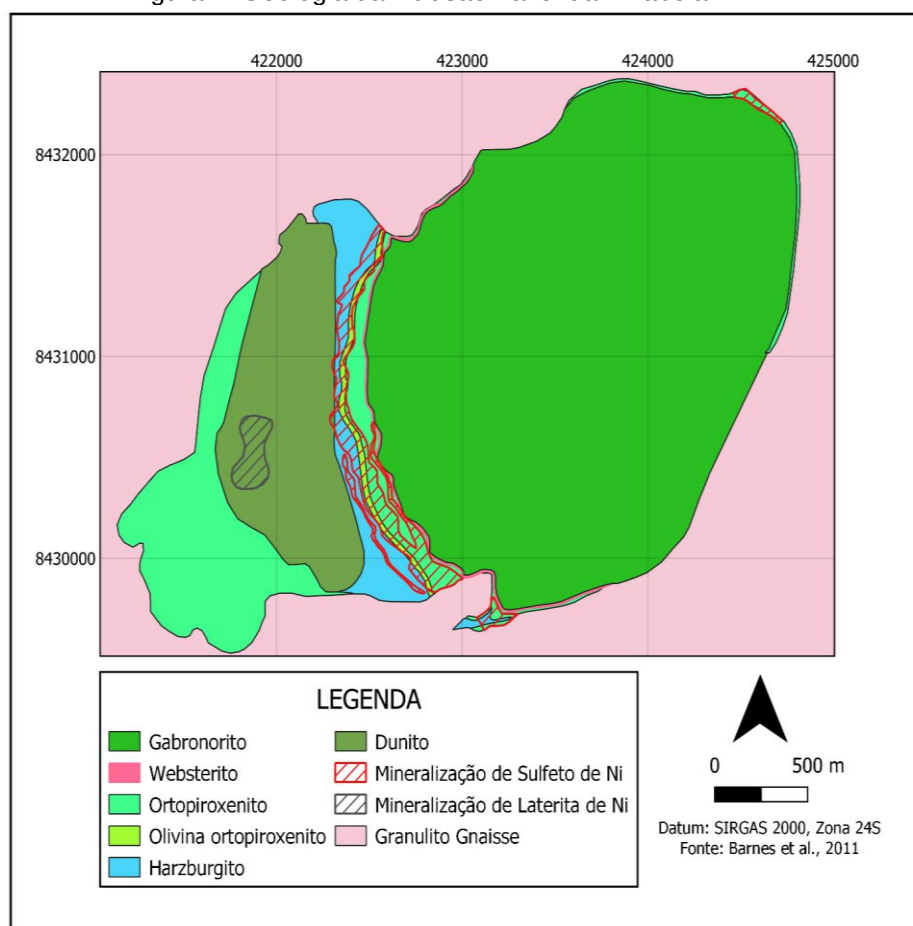
5.2 Intrusão Fazenda Mirabela

A intrusão da Fazenda Mirabela (IFM) se encontra na porção de transição entre os domínios Ipiaú e Jequié-Mutuípe, caracterizado por uma tectônica de cavalgamento (E-W) em que os granulitos da Costa Atlântica altearam as supracrustais do Domínio Jequié-Mutuípe (Abram, 1993). Suas encaixantes são definidas por rochas plutônicas e supracrustais deformadas nas fácies anfibolito a granulito (Barbosa, 1986), constituídas por gnaisses quartzo-feldspáticos intercalados com metacherts, metapelitos e formações ferríferas bandadas, rochas cálcio-silicáticas, metassedimentos manganésíferos contendo barita, associado a ofiolitos que obductaram com o cavalgamento, além de ortognaisses empobrecidos em sulfetos (Barbosa & Sabaté, 2004).

A IFM surgiu a partir da evolução de um magma parental de composição toleítica, que se diferenciou em litologias ultramáficas na base, justapostas por uma gabronoritos e cortada por diques doleríticos e pegmatíticos (Barnes *et al.*, 2011). Devido ao alto grau metamórfico, decorrente da tectônica da região de Ipiaú, grandes alinhamentos indicam zonas de cisalhamento, as quais englobam a IFM (Arcanjo *et al.*, 1998).

O corpo máfico-ultramáfico Fazenda Mirabela (CFM) (figura 7) é definido como pouco deformado, com texturas primárias cumuláticas bem preservadas com cinco litotipos, de acordo com Abram (1993), sendo eles: serpentinitos (dunitos e peridotitos), peridotitos, piroxenitos, melanogabronoritos e meso a leucogabronoritos. A intrusão tem formato oval com 4,2 km de comprimento por 2,5 km de largura. O acamamento magmático mergulha profundamente para NE, com exceção da borda, que mergulha para SW (Abram, 1993; Lazarin, 2011; Barnes *et al.*, 2011).

Figura 7. Geologia da intrusão Fazenda Mirabela.



Fonte: Elaborado pela autora (2024), com dados de Barnes *et al.*, 2011.

5.3 O depósito de Santa Rita

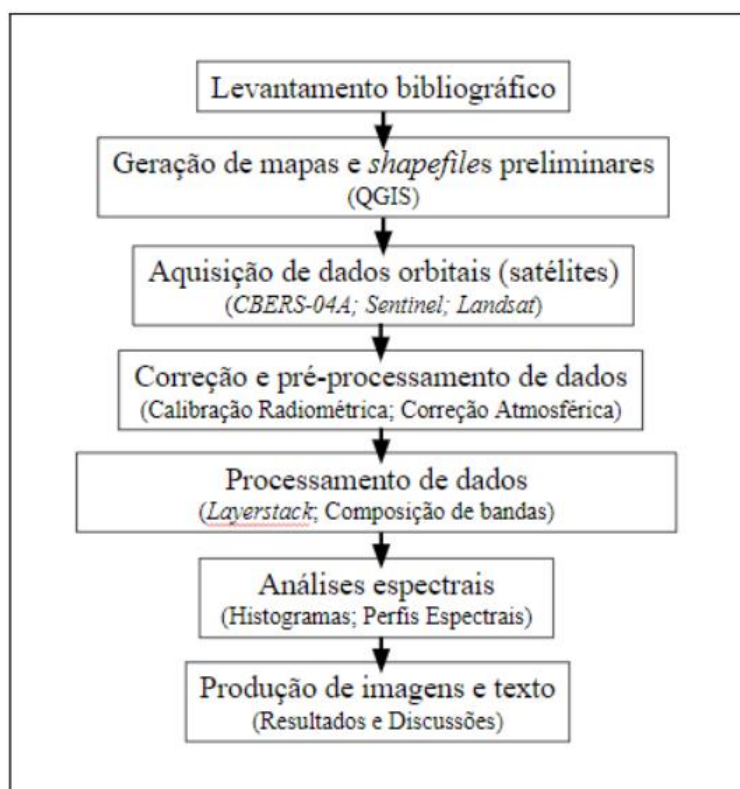
O depósito de Santa Rita se encontra na porção intermediária da IFM, sua mineralização ocorre na forma estratiforme e aumenta gradativamente de norte a sul, estando presente em diferentes partes da estratigrafia da Série Ultramáfica onde os sulfetos de Ni e Cu se encontram disseminados. A série compreende subzonas de dunitos, ortopiroxenitos de olivina intercalados com harzburgito, sobrepostos a ortopiroxenitos puros e uma camada fina de websterito (figura 7) (Barnes *et al.*, 2011).

Sua espessura varia de 220-290 metros, apresentando intervalos ricos em sulfetos que variam de 50-60 m a norte e 100-180 m em direção à porção centro-sul da intrusão. Os sulfetos de Ni-Cu se concentram nas porções basais das intrusões máfica-ultramáficas, enquanto nas porções internas ocorrem as mineralizações de EGP (Barnes *et al.*, 2011; Ferreira Filho *et al.*, 2013).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foi elaborado um fluxograma com os procedimentos executados (figura 8) para melhor visualização e identificação de tarefas. Foram utilizados os softwares QGIS Desktop 3.34.4 e ArcGIS Pro para processamento das imagens, elaboração de mapas e dos processamentos, seus usos serão detalhados ao decorrer deste capítulo.

Figura 8. Fluxograma de trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

6.1 Levantamento bibliográfico

O trabalho teve de início uma revisão bibliográfica para compreender melhor sobre o Depósito de Santa Rita, seguindo principalmente os trabalhos de Almeida (1977), Abram (1994), Barbosa & Sabaté (2003), Barnes *et al.* (2011 e 2016), Ferreira Filho, *et al.* (2013), Lazarin (2012), entre outros, para a compreensão geológica, litológica, estrutural e metalogenética da área estudada. Bem como a elaboração da caracterização fisiográfica e histórico da mina em questão, acessando dados disponibilizados pela Prefeitura de Itagibá e de Ipiáú, bem como os *sites* da mineradora Atlantic Nickel e da Appian Capital Advisory.

6.2 Geração de mapas e *shapefiles* preliminares

Foram gerados mapas e *shapefiles* preliminares da área estudada, para reconhecimento da localização e elaboração de mapas de localização e geológico utilizados neste trabalho, sendo executados pelo *software* QGIS Desktop 3.34.4. Além disso, a digitalização do mapa geológico para definir a exposição dos litotipos na mina (Figura 7), que servirá de guia para extrair a resposta espectral de cada um dos litotipos, utilizando como base o mapa de Barnes *et al.*, 2011.

Para sua elaboração foram executados os seguintes passos: digitalização do mapa geológico de Barnes *et al.* (2011), georreferenciamento com o projeto já pré-estabelecido com o *datum* SIRGAS 2000, zona 24 S; *shapefiles* para cada litologia identificada no mapa e por fim, a vetorização de cada litologia em diferentes *shapes*, tendo selecionado suas cores respectiva a representação de rochas ígneas (tons de verde e tons de magenta).

6.3 Aquisição de dados orbitais

Para os processamentos, as imagens orbitais foram retiradas a partir dos catálogos da *United States Geological Survey* (USGS), do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE) e do *European Space Agency* (ESA) para a aquisição das imagens dos satélites Landsat 8, CBERS-04A e Sentinel-2 (Figura 9), organizando-as em uma planilha (quadro 1) de dados para melhor organização e identificação das imagens adquiridas. As imagens adquiridas são referentes aos períodos de 2014-2024.

Quadro 1. Dados de aquisição de imagem.

Imagem	Satélite	Sensor	Resolução (m)	Bandas	% de nuvens	Nível de correção	Data de aquisição
CBERS4A_WPM19613120200702	CBERS-4A	WPM	8, 2 (PAN)	RGB, NIR, PAN	20.00	2	02/07/2020
CBERS4A_WPM19613120231124	CBERS-4A	WPM	8, 2 (PAN)	RGB, NIR, PAN	40.00	2	24/11/2023
LC08_L2SP_216070_20140424_20200911_02_T1	LANDSAT 8	OLI_TIRS	30, 15	RGB, NIR PAN	8.47	2	24/04/2014
LC08_L2SP_216070_20240318_20240402_02_T	LANDSAT 8	OLI_TIRS	30, 15	RGB, NIR, PAN	6.80	2	18/03/2024
S2A_MSIL2A_20190715T125311_N0500_R052_T24LVK_20230604T162041	SENTINEL-2	MSI	10, 20, 60	RGB, NIR, SWIR	7.70	2	15/7/2019
S2B_MSIL2A_20240524T125309_N0510_R052_T24LVK_20240524T163238	SENTINEL-2	MSI	10, 20, 60	RGB, NIR, SWIR	21.41	2	24/5/2024

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

6.3.1 CBERS-04A

O satélite CBERS-04A possui como principal sensor a Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM), caracterizado por 4 bandas multiespectrais, cobrindo o espectro visível (RGB) e NIR, com resolução de 8 metros, além de uma banda pancromática, com 2 metros de resolução. Ele orbita a uma altitude de 778 km, com um tempo de revisita de 26 dias. Os dados serão adquiridos gratuitamente através da plataforma do INPE (<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>).

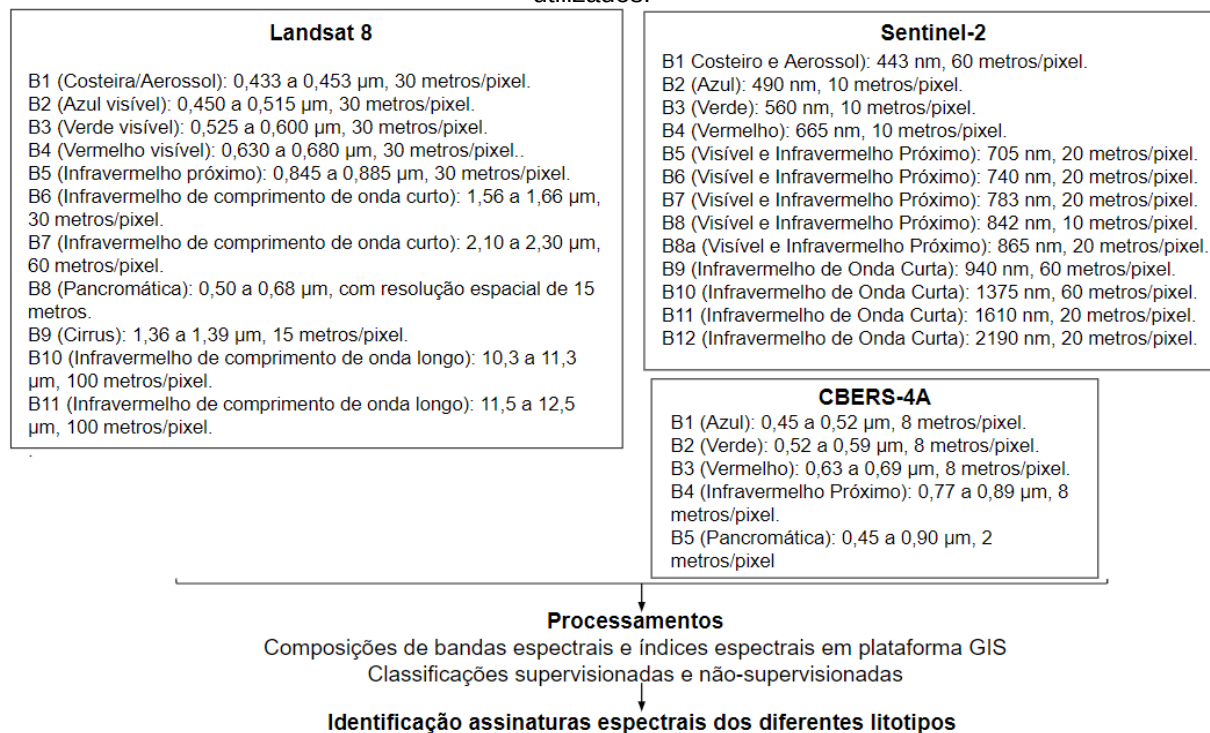
6.3.2 Sentinel-2

O Sentinel-2, dispõe de apenas um sensor, o *Multispectral Instrument* (MSI), que cobre uma ampla faixa espectral, contando com 13 bandas espectrais, cobrindo todo o espectro visível, NIR e infravermelho termal. Sua resolução espacial varia entre 10, 20 e 60 metros para diferentes bandas espectrais. Possui uma órbita polar com altitude de 786 km, com um tempo de revisita de 5 dias e seus dados podem ser adquiridos gratuitamente pela ESA (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access>).

6.3.3 Landsat 8

O satélite possui dois sensores: o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Possui 11 bandas espectrais, que cobrem todo o espectro visível, NIR e infravermelho termal, contando com uma resolução espacial de 30 metros para as bandas espectrais visíveis e infravermelhas, e de 15 metros para a banda pancromática. Ele orbita a uma altitude de 705 km, com um tempo de revisita de 16 dias. Os dados podem ser adquiridos gratuitamente pelo USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Figura 9. Especificações técnicas de cada uma das bandas espectrais dos satélites que serão utilizados.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

6.4 Correção e pré-processamento dos dados

Após as aquisições das imagens, algumas correções foram necessárias para o melhor aproveitamento e resultados esperados nos processamentos e composições das imagens, já que as adquiridas, podem não ter, principalmente, calibração radiométrica, além de correções atmosféricas.

A calibração radiométrica é essencial por conta dos sensores da câmera, que não possuem capacidade de medir a reflectância dos objetos imageados, mas sim de reproduzir a quantidade de energia eletromagnética que chega ao sensor no comprimento de onda para o qual o sensor foi desenvolvido (Khanna *et al.*, 2017). Nesse contexto, a correção visa retificar as distorções que ocorrem nas imagens devido a variações do sensor, do alvo e da atmosfera (Richards, 2013). A calibração radiométrica é realizada através da comparação das medidas de reflectância obtidas a partir de imagens de satélite (Mather, 2016) e o resultado é um conjunto de coeficientes que são utilizados para converter os valores de número digital (DN) da imagem em valores de reflectância.

Já a correção atmosférica é necessária devido a interação entre os gases e as partículas presentes na atmosfera com o fluxo eletromagnético proveniente do sol,

que prejudicam a passagem das ondas eletromagnéticas através da atmosfera, causando interferências. Essas ocorrem por conta de três tipos de interações atmosféricas (espalhamento, absorção e reflectância) na energia reemitida por um alvo, quando este é visualizado do espaço (Novo, 2010; Welter et al., 2020).

A correção é realizada através de modelos matemáticos que simulam o comportamento da atmosfera e que permitem calcular a quantidade de radiação solar que é absorvida e espalhada. O resultado é uma imagem corrigida que representa a distribuição da reflectância da superfície terrestre sem os efeitos da atmosfera (Lillesand et al., 2015). Para maior eficiência, foi dada prioridade a aquisição de imagens que já tivessem correções atmosféricas incluídas.

No ArcGIS Pro, para a correção de calibração radiométrica, as imagens recortadas são importadas em “Adicionar Dados”, posteriormente será usada a “Calculadora *Raster*”, que pode ser encontrada através de “Ferramentas”, “Ferramentas de Análise de Imagem”, “Álgebra de Mapas”, “Calculadora *Raster*”. Ao todo são 17 imagens: 6 do Landsat 8 e 11 do Sentinel-2; desconsiderando as bandas de aerossol (banda 1).

A calibração radiométrica do Landsat 8 está atrelada ao “*Top of Atmosphere*” (TOA), que é a interface entre a atmosfera da Terra e o espaço, onde a radiação solar é medida antes de interagir com a superfície terrestre e a atmosfera. No contexto do Sensoriamento Remoto, o TOA é importante para o fornecimento de uma base para a conversão de contagens digitais (DN) em reflectância, tendo em vista fatores atmosféricos (Kaufman & Friedlander, 1994).

Para a execução do redimensionamento da reflectância, foram utilizados os coeficientes radiométricos disponíveis no arquivo de metadados adquirido das imagens do satélite (arquivos “...MTL_txt”), utilizando as fórmulas 1 e 2 disponíveis:

Fórmula 1. Calibração radiométrica das bandas Landsat 8

$$\rho\lambda' = MpQcal + Ap$$

Fórmula 2. Calibração radiométrica das bandas Landsat 8

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\sin\theta_{SE}}$$

Onde:

$\rho\lambda'$ = TOA, sem a correção do ângulo solar

Mp = REFLECTANCE_MULT_BAND_x

$Qcal$ = Valores de pixel (DN) de produto padrão quantificados e calibrados.

Ap = REFLECTANCE_ADD_BAND_x

$\rho\lambda = \text{TOA}$
 $\theta_{SE} = \text{Ângulo da elevação local do sol}$

Já para as imagens do Sentinel-2, a relação entre DN e a reflectância é estabelecida pela fórmula 3:

Fórmula 3. Calibração radiométrica das bandas Sentinel 2

$$DN = 10000 * \text{Reflectância}$$

Em contrapartida, para as imagens do satélite CBERS-4A, não foi possível realizar a calibração, já que não foram encontrados os parâmetros necessários para tal. Mas, para critério de comparação com os outros satélites, será utilizada a fórmula 4, para a normalização dos dados.

Fórmula 4. Normalização das bandas Cbers-4A

$$\text{Reflectância} = DN/1000$$

6.5 Processamento dos dados

Para o processamento de dados será utilizado o software ArcGIS Pro, seguindo os procedimentos de *Layerstack*, composição de bandas, aritmética de bandas e as análises de perfis espectrais.

6.5.1 *Layerstack*

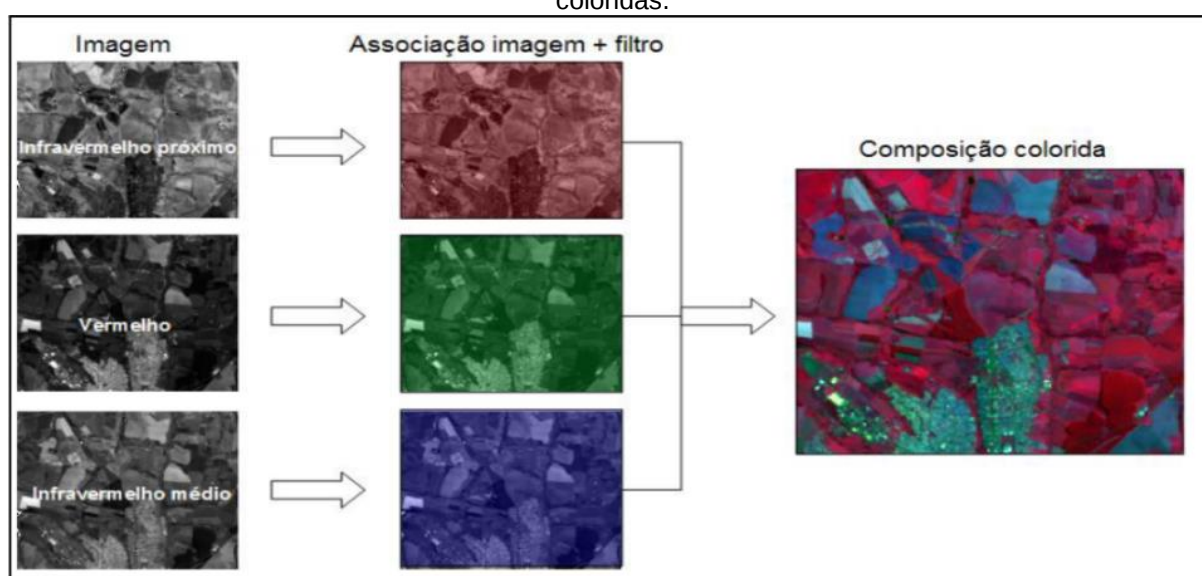
Layerstack é uma ferramenta utilizada para a combinação de várias bandas em uma única imagem/banda. É baseado no princípio de que diferentes bandas podem fornecer informações mais precisas de uma determinada área. Ao combinar várias bandas, é possível obter uma representação mais completa dos elementos presentes no terreno, como relevo, vegetação, corpos d'água, litotipos e estruturas. A combinação de diferentes bandas pode facilitar as análises e interpretação dos dados (Aero Engenharia, 2023).

Após a correção de calibração radiométrica nas bandas, foi realizado a junção das *layers*, que será feita através de “Imagens”, “Funções de *Raster*”, “Gerenciamento de Dados”, “Bandas Compostas”, ordenando corretamente as imagens corrigidas em “*Rasters*” e, por fim, “Criar Nova Camada”, realizando assim, o *layerstack* das imagens.

6.5.2 Composição de bandas

As composições de bandas são derivadas da sobreposição de diferentes bandas espectrais para a geração de diversos resultados. As composições coloridas são a junção entre as bandas originais e os filtros coloridos vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*) (Figura 10). A composição verdadeira é aquela em que as bandas são associadas aos seus respectivos filtros. Enquanto as composições de falsa cor são aquelas em que as bandas não estão associadas à cor do filtro (Messias & Ayer, 2017).

Figura 10. Exemplo de associação de bandas com seus filtros de cor para composição de bandas coloridas.



Fonte: Messias & Ayer, 2017.

6.6 Análises espectrais

As análises espectrais foram realizadas para a identificação das assinaturas espectrais dos litotipos presentes na área, para isso foram gerados perfis espectrais e histogramas, que serão mais bem detalhados a seguir.

6.6.1 Histogramas

O histograma é uma das formas de representar a distribuição da escala de cinza (ou nível de brilho) de uma imagem. Ele indica quantos pixels há na imagem (imagens de 8 bits, variam de 0, representando preto a 255, representando branco) ou, de forma equivalente, qual a proporção da imagem que corresponde a cada valor da escala de cinza (Crosta, 1999; Messias & Ayer, 2017).

Os histogramas também representam dados digitais, chamados de discretos, que são colunas que representam as distribuições de intensidades, que não podem ser divididas, correspondendo a números inteiros, implicando no realce de contraste em imagens (Crosta, 1999).

6.6.2 Perfis espectrais

O comportamento espectral depende da estrutura atômica e molecular de cada alvo, variando de acordo com a distribuição dos elétrons em diferentes níveis energéticos, em torno dos núcleos dos átomos. Estes níveis eletrônicos podem absorver maior ou menor quantidade da energia da reflectância espectral da matéria (REM) (Figueiredo, 2005).

O perfil espectral tem a capacidade de auxiliar na diferenciação das geofácies nas imagens multiespectrais, já que em cada banda diferentes alvos refletem a REM em diferentes níveis, devido às características específicas de cada alvo (Messias e Ayer, 2017).

Com base no *shapefile* criado (Figura 7), todos os litotipos foram mapeados. Dessa forma, será possível extrair os perfis espectrais de cada litotipo a partir de cada conjunto de imagens dos diferentes satélites, restringindo a assinatura espectral coletada à área representativa de cada litotipo.

6.7 Produção de imagens e textos

Com todos os dados adquiridos e processamentos executados, foram elaboradas imagens e discussões dos resultados obtidos das análises e interpolação dos dados.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, sendo eles, as composições de bandas, histogramas e perfis espectrais, além da interpretação dos produtos gerados. Os dados a seguir serão apresentados de acordo com as litologias da área de estudos e as análises realizadas com os produtos de cada um dos satélites.

7.1 Análise preliminar das imagens CBERS-04A

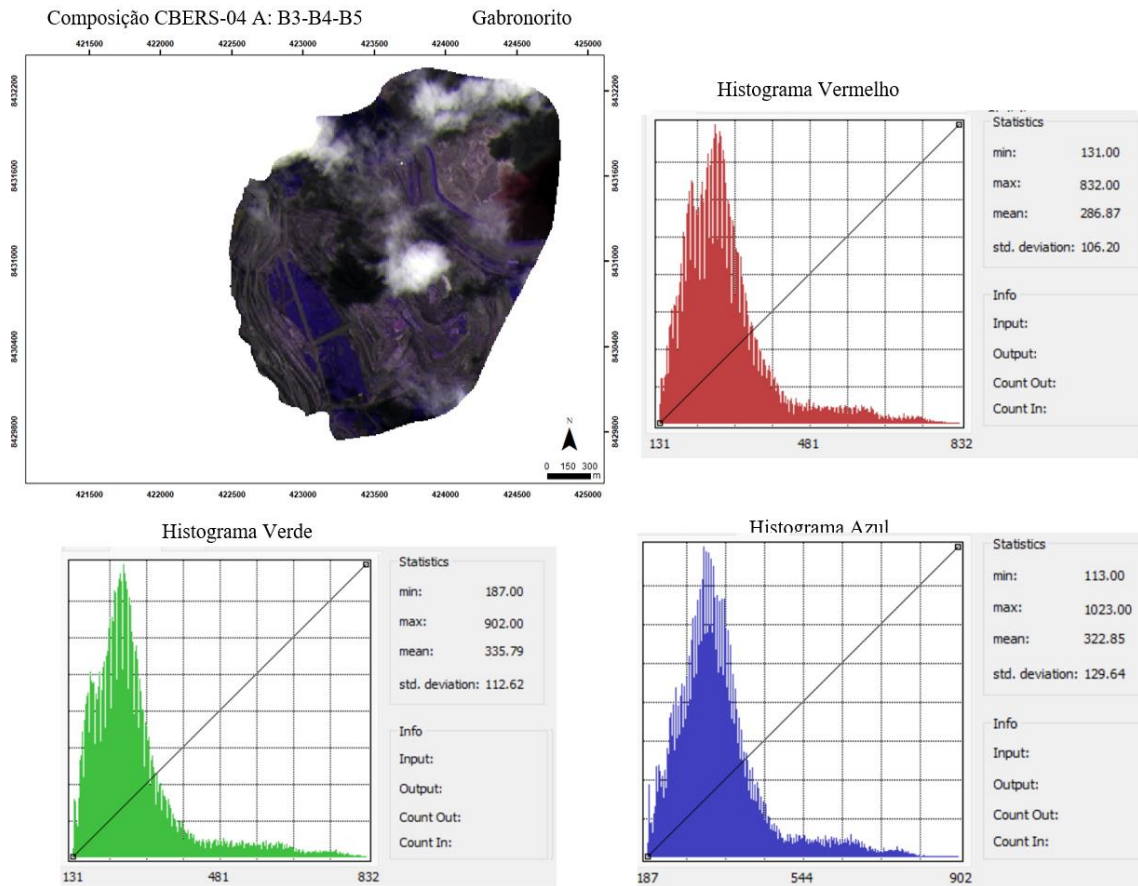
Considerando a falta de informação para efetiva correção das imagens do CBERS-4A, foram elaborados histogramas que auxiliaram na melhor interpretação dos dados adquiridos. Uma ampla busca foi realizada em diversos bancos de dados e artigos, mas a equação para cálculo da refletância não é apresentada. Desta forma as análises foram realizadas com base em produtos gerados a partir de extensos testes.

Para isso, foram executados os processamentos, onde a combinação de bandas B3-B4-B5 obteve diferentes respostas para os seis litotipos abordados na área de estudo. É importante ressaltar que não existem trabalhos publicados com o satélite CBERS-04A para identificação de litotipos máficos-ultramáficos, o que é uma fronteira de conhecimento. Entretanto, um ponto de desvantagem é que a maior parte das imagens para a localidade, do CBERS-4A, possuem uma grande porcentagem de nuvens, provavelmente devido sua proximidade com o litoral. Desta forma, muitas imagens apresentam interferências de nuvens para algumas litologias, o que dificulta a extração de dados precisos.

7.1.1 Análise dos histogramas do litotipo Gabronorito

Os histogramas do litotipo gabronorito apresentam dispersões, que podem se dar por conta da sua representatividade espacial, ou seja, a imagem está registrando alvos para além do litotipo, como vegetação, nuvens e outros elementos (Figura 11). Além disso, apesar das dispersões, os histogramas apresentam certa homogeneidade, podendo significar que assinaturas espectrais podem ser extraídas.

Figura 11. Histogramas RGB para o litotipo gabronorito.

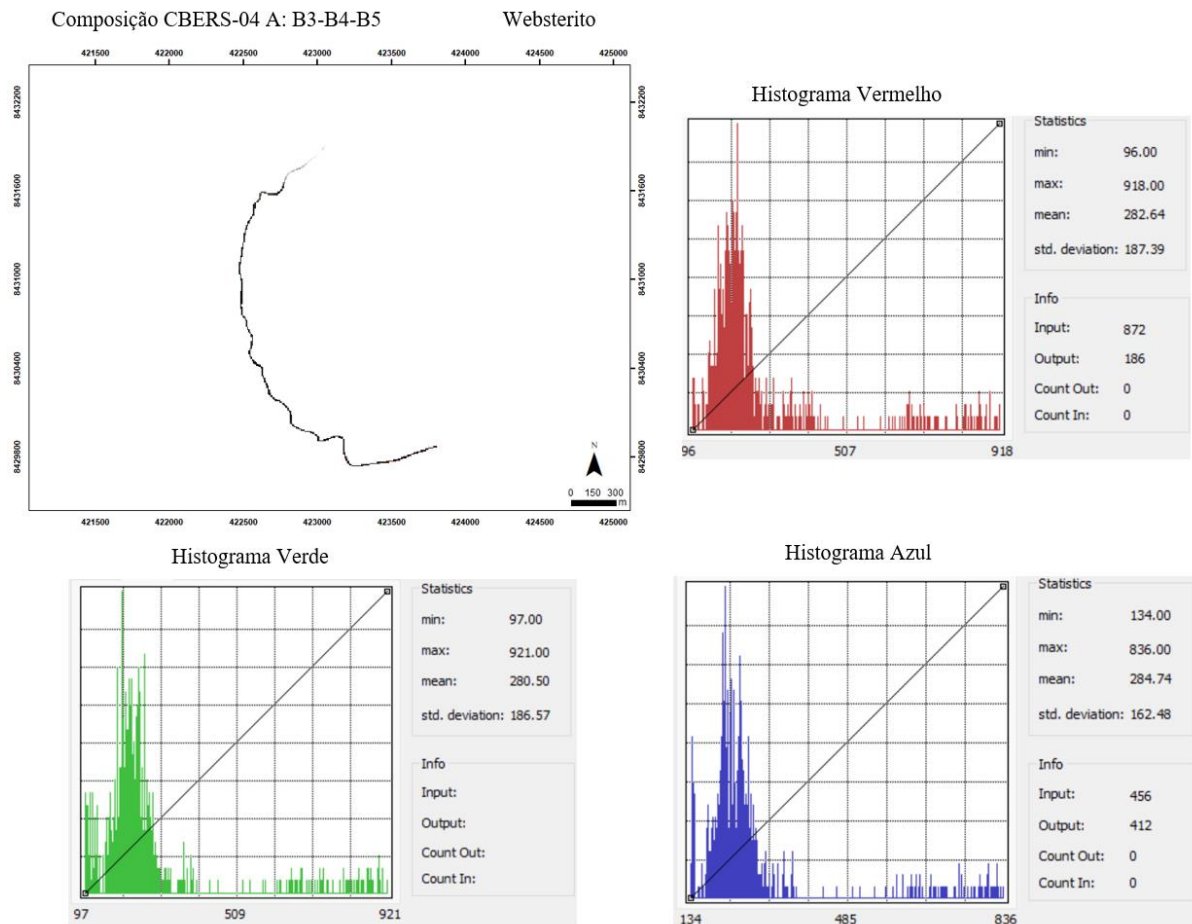


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

7.1.2 Análise dos histogramas do litotipo Websterito

Para o litotipo websterito, pode-se observar que apesar de não estar totalmente uniforme, seus picos são bastante representativos, sendo indícios de assinaturas espectrais homogêneas na localidade. Ademais, há interferência de nuvens, o que pode causar o ruído nos gráficos (Figura 12).

Figura 12. Histogramas RGB para o litotipo websterito.

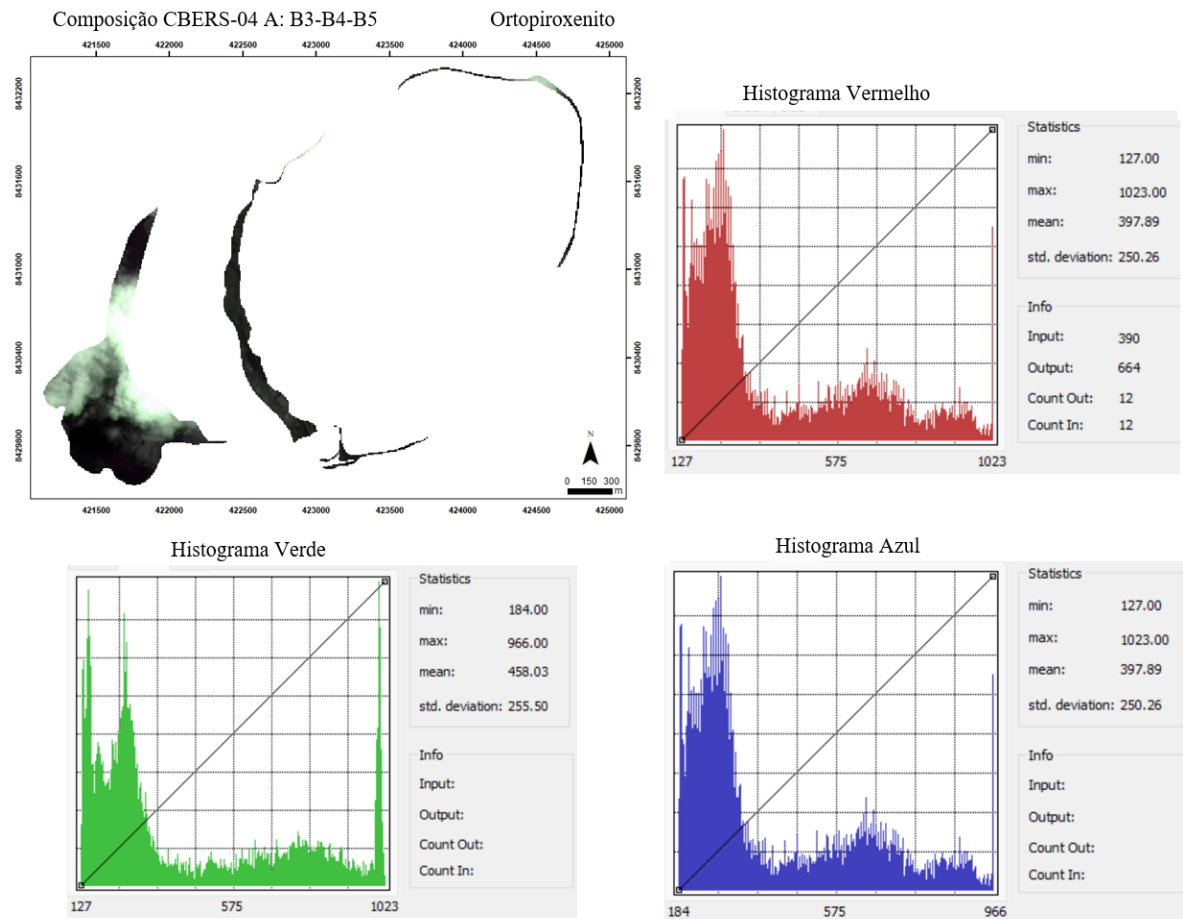


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

7.1.3 Análise dos histogramas do litotipo Ortopiroxenito

Os dados do litotipo ortopiroxenito são bem dispersos e não uniformes, apresentando picos muito altos de reflectância (vermelho= 1023, verde= 1023 e azul= 966), podendo ser causado pela alta quantidade de nuvens (Figura 13). A dispersão pode indicar que seja necessário trabalhar com porções mais individualizadas de alguns litotipos, já que é possível observar uma grande quantidade de nuvens na porção sudoeste, requerendo certos tratamentos nessa região para extração de respostas mais uniformes e representativas, enquanto o restante das exposições possui uma representatividade mais homogênea no mapa. Desta forma, a análise espectral das ocorrências do litotipo deverão ser realizadas de forma individualizada.

Figura 13. Histogramas RGB para o litotipo ortopiroxenito.

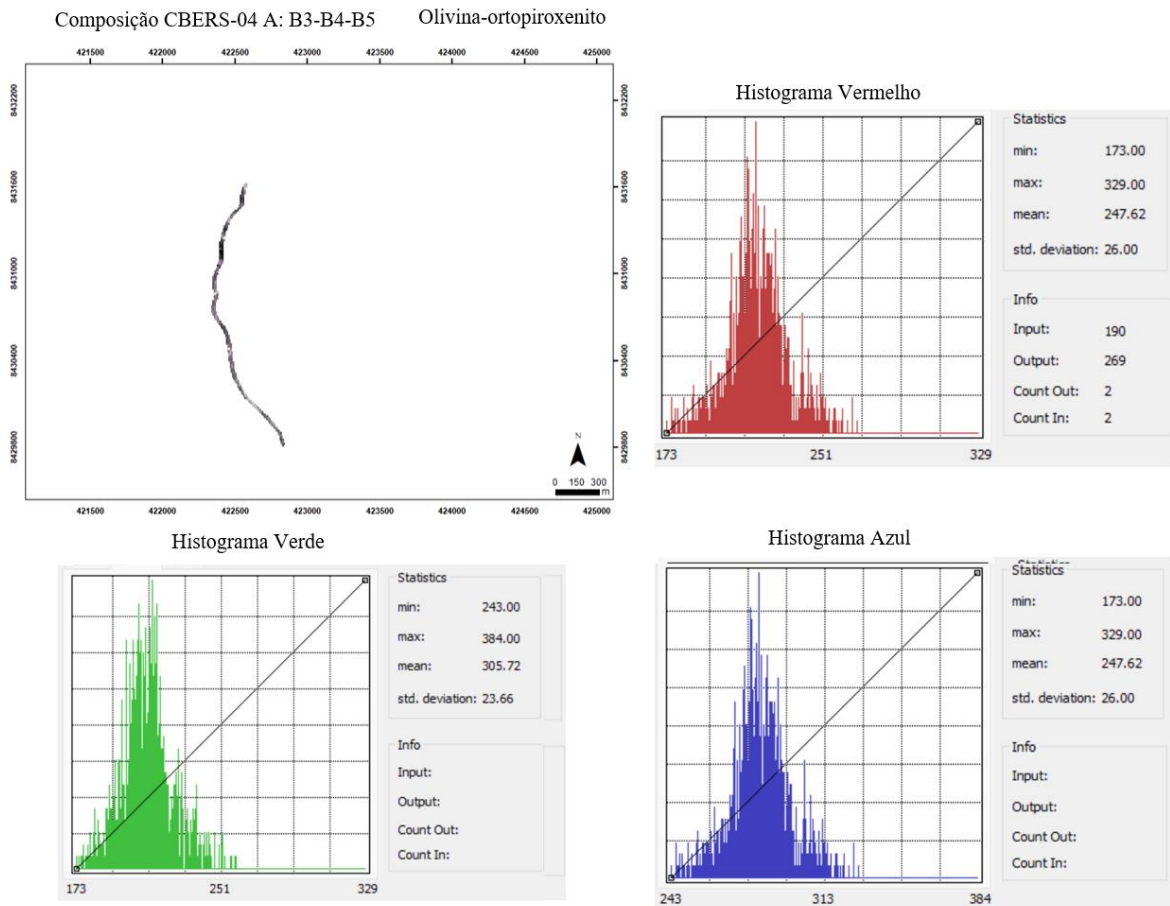


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

7.1.4 Análise dos histogramas do litotipo Olivina Ortopiroxenito

O histograma do litotipo olivina ortopiroxenito foi o que apresentou dados mais coerentes com a composição de bandas supracitadas, mesmo com picos altos consequentes da grande quantidade de nuvens, apresentando gráficos mais homogêneos e concentrados que o restante. Seus resultados se provam bastante positivos, já que é onde há a mineralização de níquel sulfetada (Figura 14). O resultado pode trazer indícios de que será possível encontrar a assinatura espectral da mineralização de níquel, o que possibilitará, em estudos futuros, procurar essa assinatura em toda a região.

Figura 14. Histogramas RGB para o litotipo olivina ortopiroxenito.

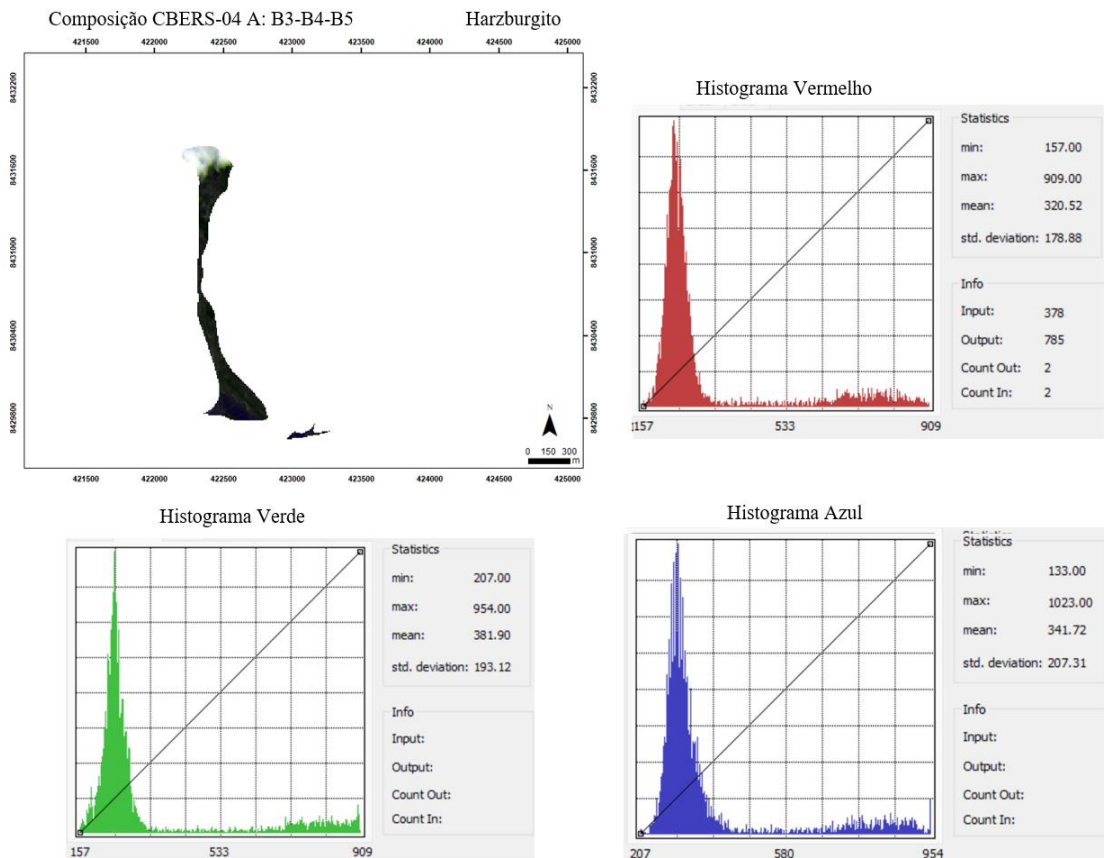


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

7.1.5 Análise dos histogramas do litotipo Harzburgito

Bem como o litotipo websterito, o harzburgito apresenta picos representativos, indicando possíveis assinaturas espectrais válidas para o CBERS-04A (Figura 15). Analisando a combinação de bandas, a assinatura espectral pode incluir a interferência de nuvens em uma pequena porção, o que pode não prejudicar a análise espectral.

Figura 15. Histogramas RGB para o litotipo harzburgito.

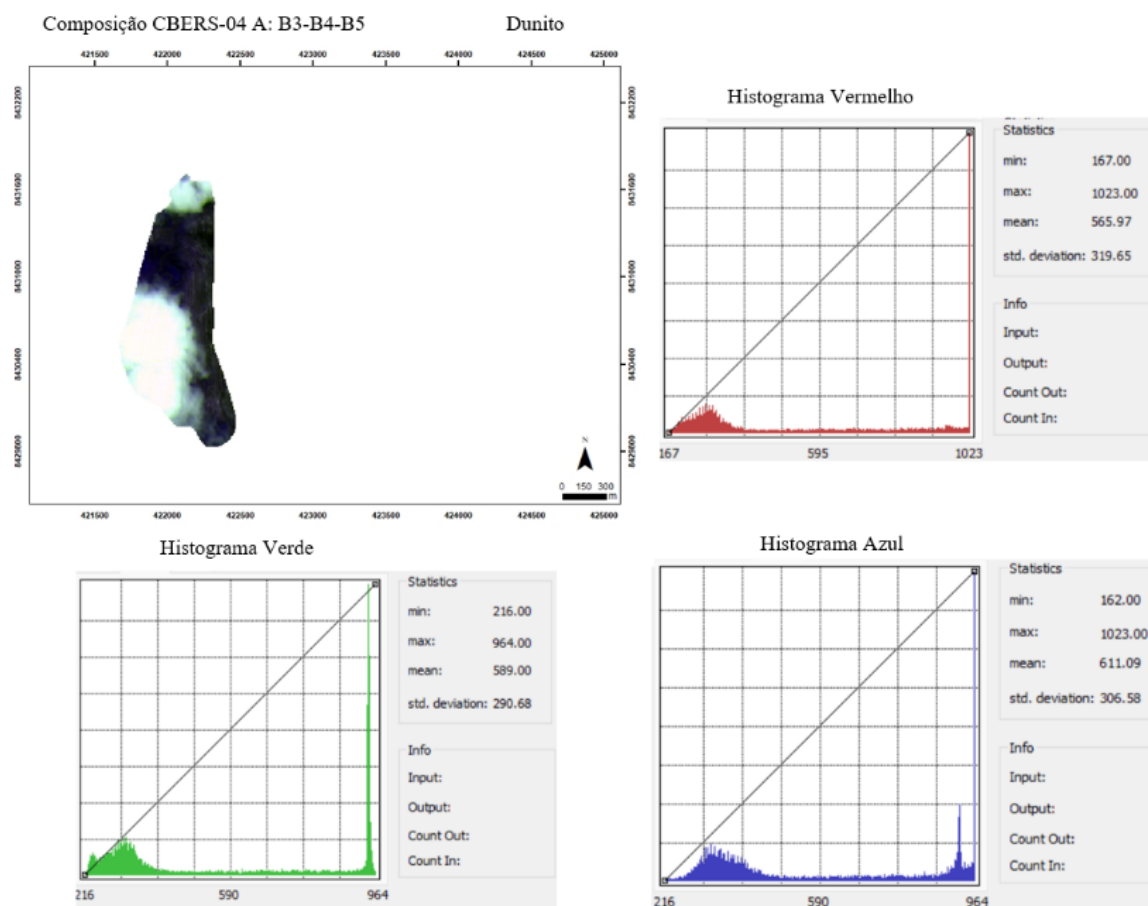


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

7.1.6 Análise dos histogramas do litotipo Dunito

No litotipo dunito, os histogramas apresentam alguns picos de reflectância (vermelho= 1023, verde= 964, azul= 964), derivadas das respostas da integração da energia eletromagnética com as nuvens, que se fazem bastante presentes no mapa, podendo dificultar as análises e requerendo melhores tratamento de imagem, bem como ocorre entre os litotipos de ortopiroxenito e gabronorito (Figura 16).

Figura 16. Histogramas RGB para o litotipo dunito.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

7.2 Perfis Espectrais

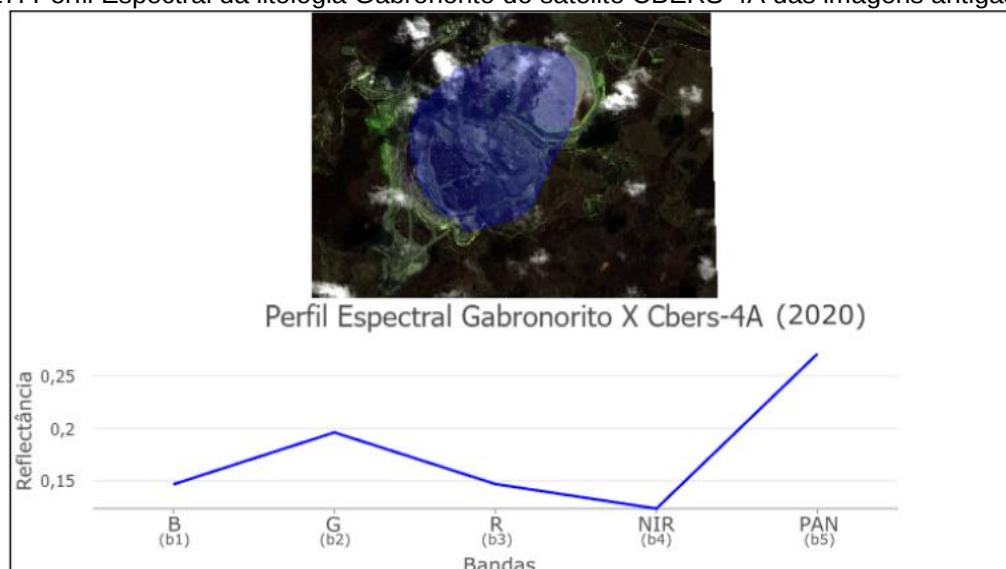
É válido salientar que as cores utilizadas nos gráficos dos perfis espectrais foram escolhidas para melhor visualização das litologias nas imagens de satélites. Ademais, todas as imagens dos perfis encontram-se na composição verdadeira, sendo elas B3-B2-B4 para as imagens CBERS-4A e B4-B3-B2 para imagens do Landsat 8 e do Sentinel-2 – como a assinatura espectral é extraída para todas as bandas, a escolha da composição cor verdadeira foi apenas para visualização nas imagens.

7.2.1 Perfis Espectrais do Gabronorito

O litotipo do gabronorito apresentou, para o satélite CBERS-4A, índices de reflectância de 0-0,37, aproximadamente. Nos dados mais antigos (20/07/2020), foi observado um pico na b2 e uma resposta ainda mais alta na b5 (Figura 17) e um vale acentuado na b4. Já nos dados mais recentes (24/11/2023), as respostas são bastante

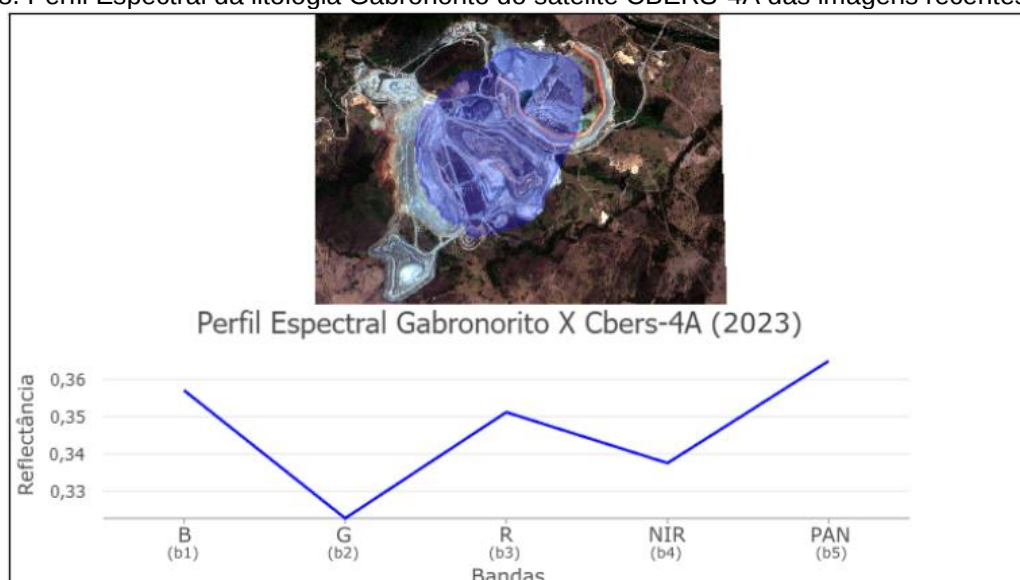
divergentes (Figura 18), com pico em b1 e respostas muito altas nas bandas b1 e b5. Além disso, pode ser observado um vale em b2. As imagens mais recentes são mais representativas da real assinatura espectral, por conta da menor presença de nuvens e uma mais evidente exposição do litotipo, entretanto, por conta da expressividade em área do litotipo, as assinaturas tendem a ter mais influência de outros elementos e alvos da superfície terrestre, o que pode impactar negativamente a definição de uma assinatura espectral.

Figura 17. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite CBERS-4A das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

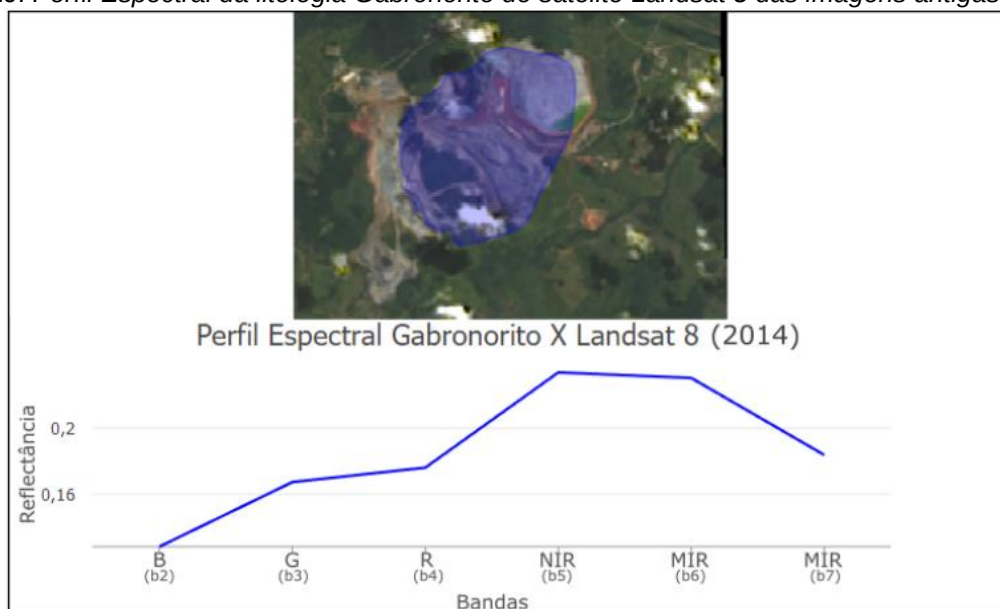
Figura 18. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite CBERS-4A das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

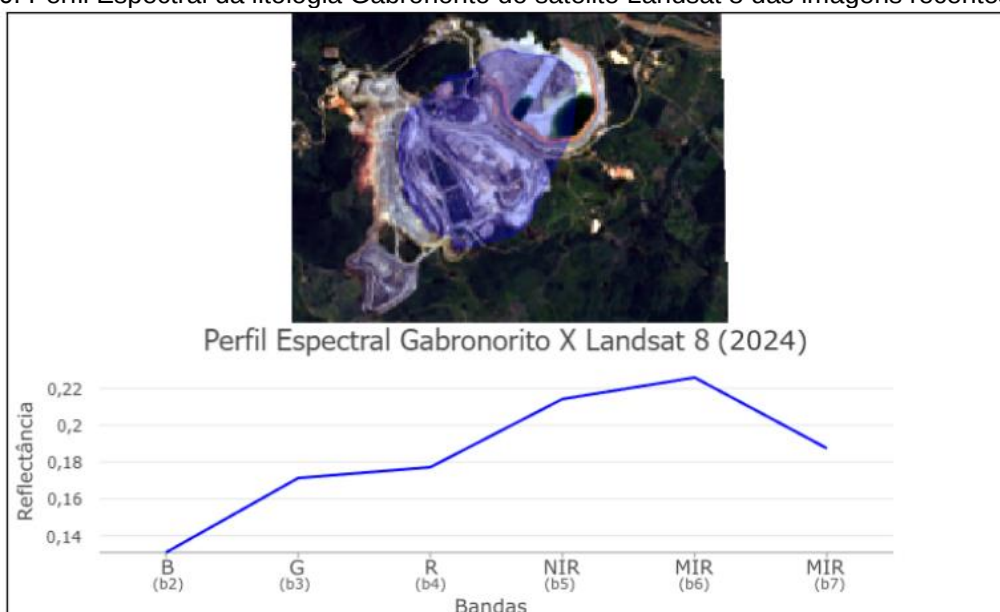
Já para as imagens do Landsat 8, os valores vão de 0-0,30 em ambos os casos. Na imagem mais antiga (24/04/2014), são identificados picos em b5 e b6, bem como um vale em b2 (Figura 19). Em comparação com a imagem recente (18/03/2024), a diferença mais explícita é observada na b6, que possui valores mais elevados (Figura 20). Em linhas gerais, a assinatura espectral se mantém equivalente, validando suas altas reflectâncias e absorções em cada banda.

Figura 19. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

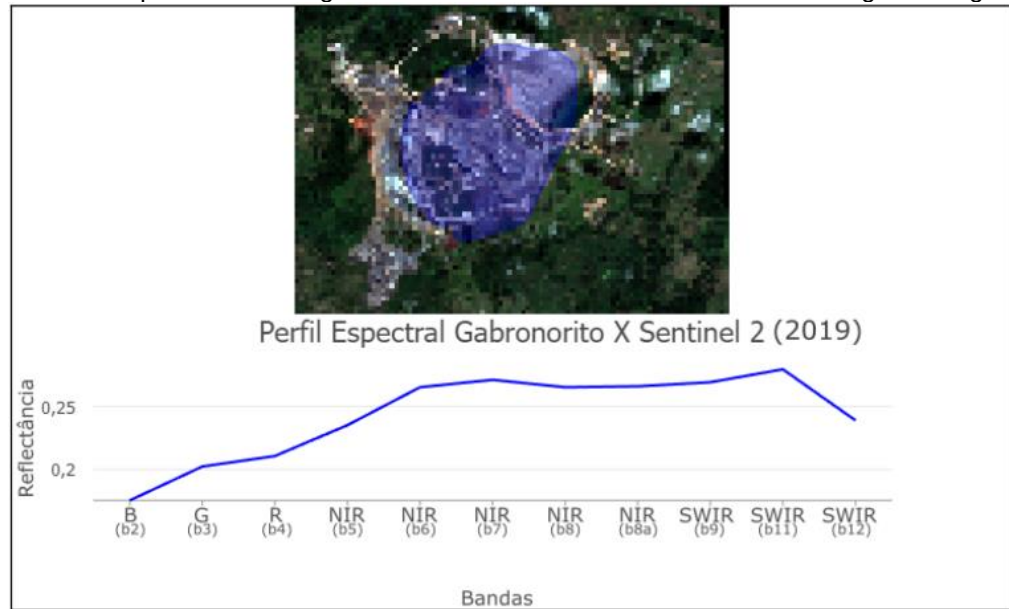
Figura 20. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

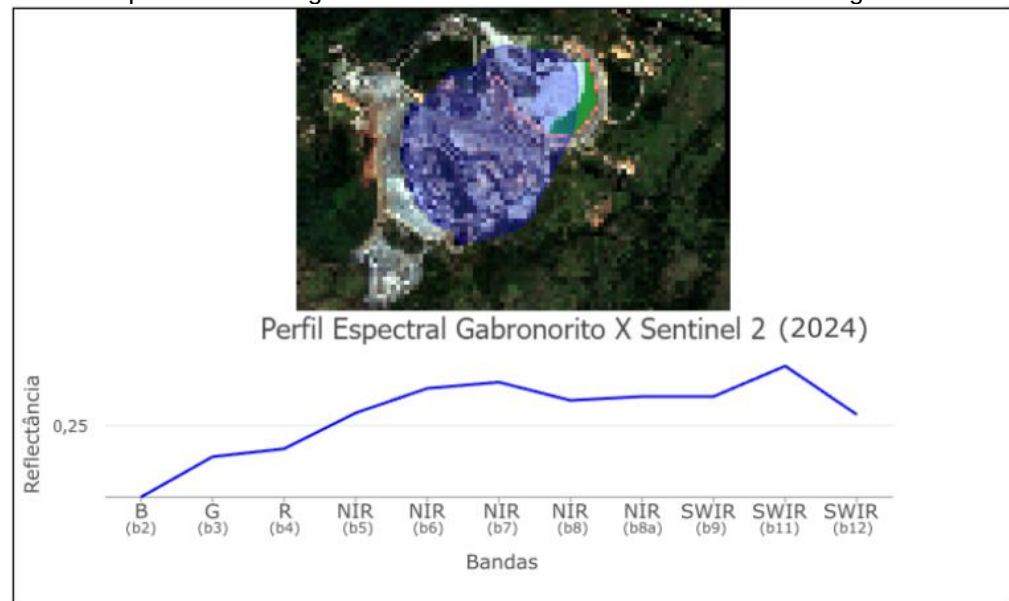
Para as imagens do Sentinel-2, os valores se assemelham aos do Landsat (0-0,30). Na imagem mais antiga (15/07/2019) existem altas respostas na maioria das bandas NIR (b6 em diante) e dos SWIR, além de um vale na b1 (Figura 21). Quanto à imagem recente (24/05/2024), pode-se notar os mesmos resultados para as bandas RGB e um aumento dos valores das bandas NIR e há um maior destaque para b11 (SWIR), apresentando um pico (Figura 22).

Figura 21. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite Sentinel-2 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 22. Perfil Espectral da litologia Gabronorito do satélite Sentinel-2 das imagens recentes.



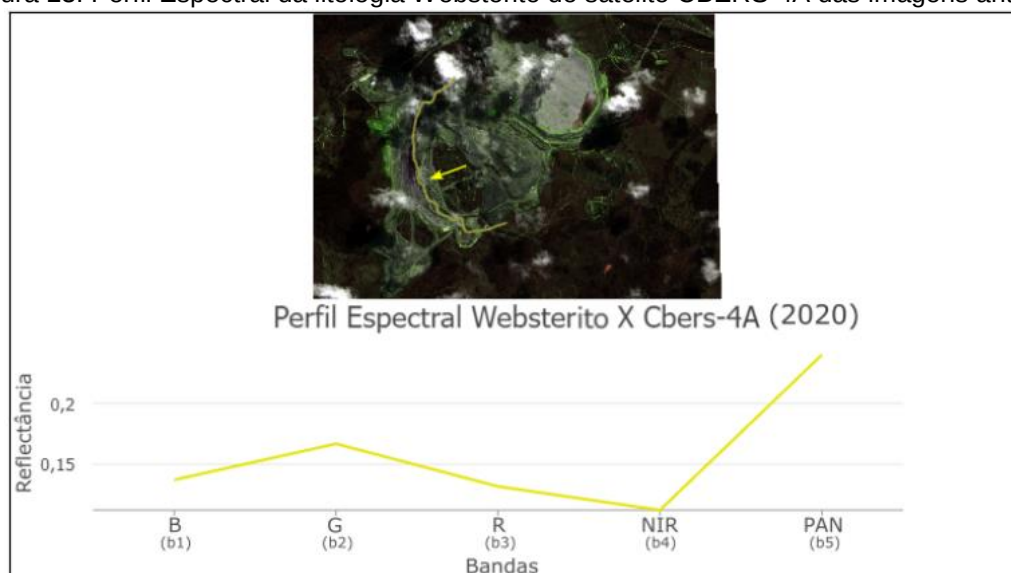
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A maior diferença entre os satélites se encontra nas bandas NIR, principalmente no que diz respeito às respostas do CBERS-4A. Diferentemente dos outros dois satélites, ele apresenta respostas baixas a muito baixas na banda de infravermelho próximo. Além disso, apenas sua imagem antiga possui um resultado baixo para a banda R, enquanto as demais possuem valores intermediários a altos. Os satélites Sentinel-2 e Landsat 8, além de possuírem valores muito próximos de reflectância, possuem respostas semelhantes. Neste sentido, as curvas de assinatura espectral para o litotipo puderam ser identificadas.

7.2.2 Perfis Espectrais Websterito

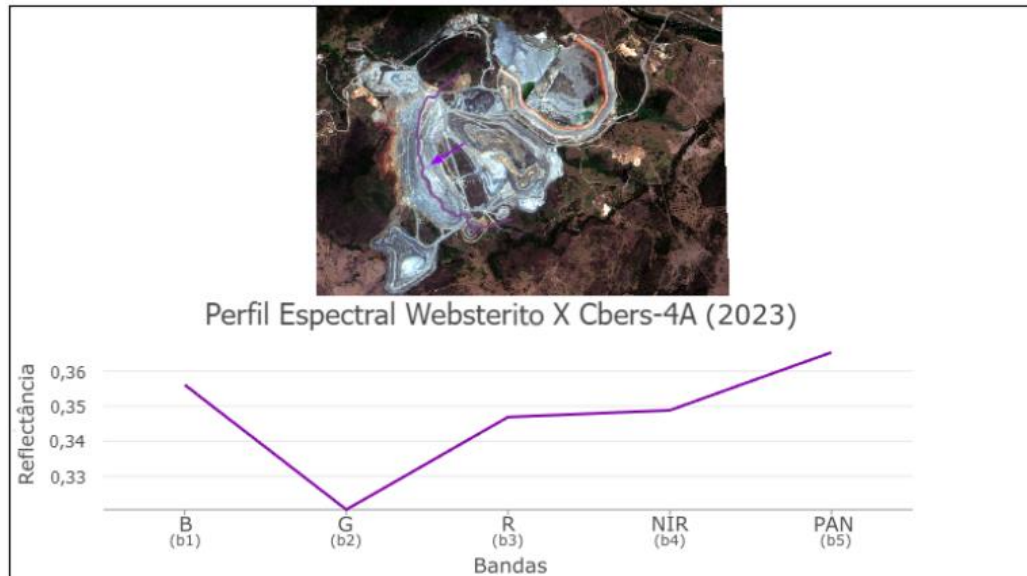
No litotipo Websterito, o satélite CBERS-4A possui valores de reflectância de 0-0,37, sua maior resposta na imagem antiga é proveniente da b2 (Figura 23), além de altos valores na banda PAN. Em contrapartida, a resposta mais baixa é da b4. Na imagem mais recente, seus valores mais altos são resultados das bandas b1 e b5 (figura 24), enquanto b1 e b4 apresentam o mesmo valor (intermediário) e seu vale está na b2.

Figura 23. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite CBERS-4A das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

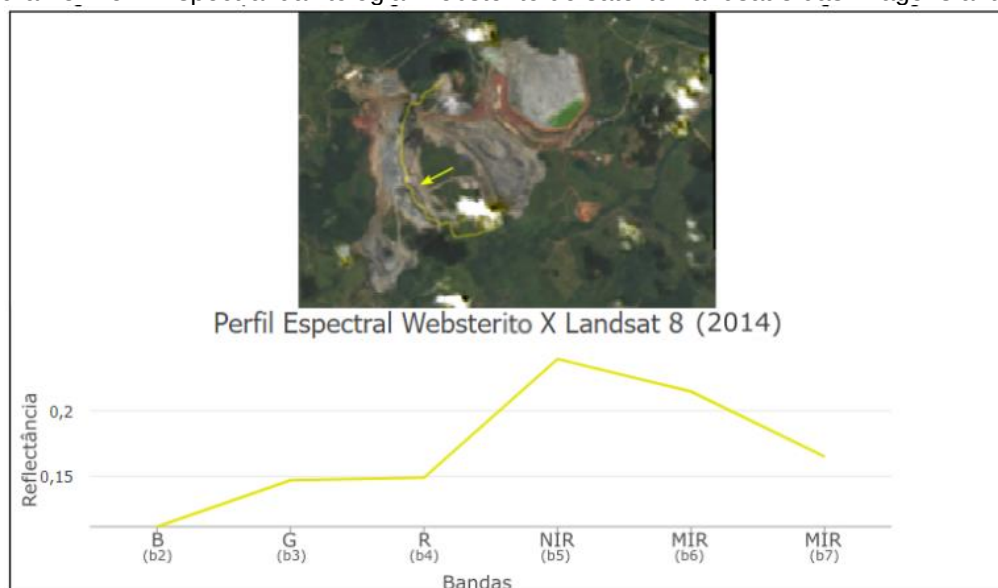
Figura 24. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite CBERS-4A das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

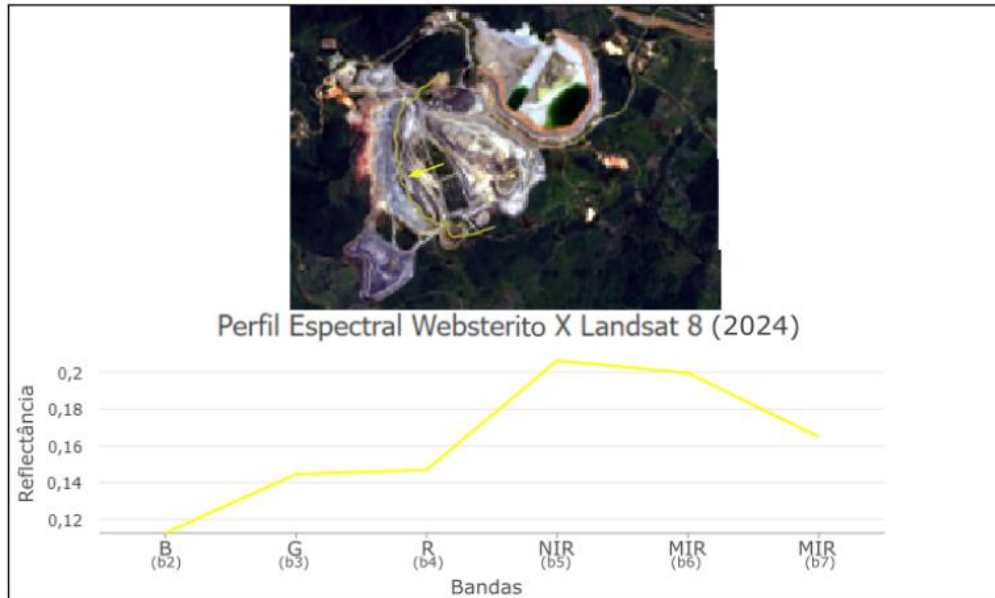
As imagens do Landsat 8 dispõem de valores entre 0-0,30 (Figuras 25 e 26). A mais antiga apresenta pico na b5 e altos valores na b6, ao passo que seu vale é marcado pela b2. Na imagem recente, as mesmas características ocorrem, um indicativo de que foi possível extrair a assinatura espectral do litotipo, independentemente de interferências de outros elementos da superfície.

Figura 25. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

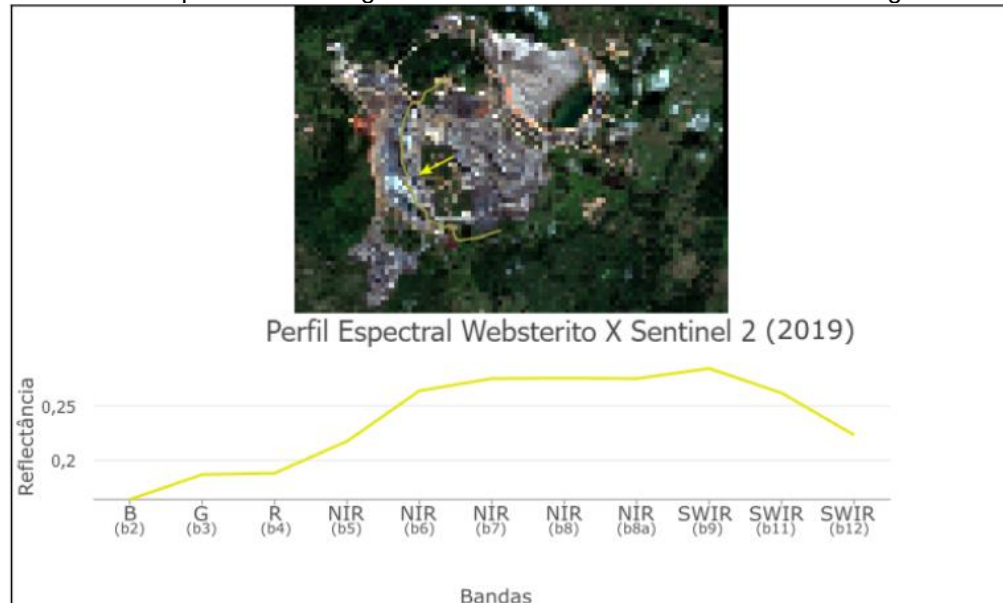
Figura 26. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

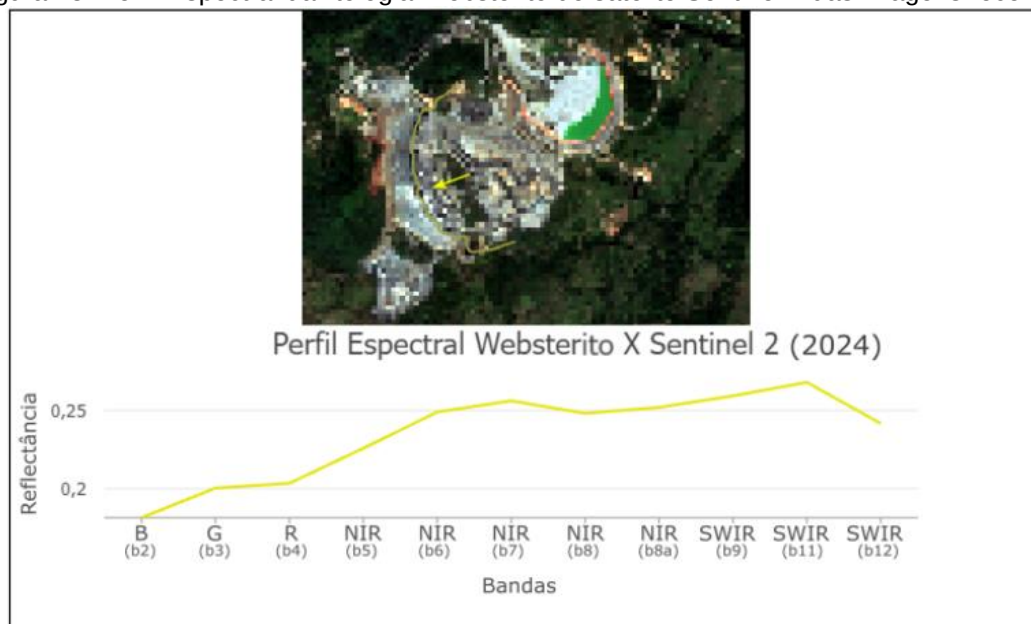
Por sua vez, as imagens do Sentinel-2 apresentam os mesmos valores que o satélite anterior (0-0,30). Na imagem antiga, pode-se constatar altos valores das bandas NIR (a partir da b6) até a primeira banda SWIR (b9) (figura 27), enquanto seu vale se encontra na b2. O mesmo ocorre para a imagem mais recente.

Figura 27. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 28. Perfil Espectral da litologia Websterito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

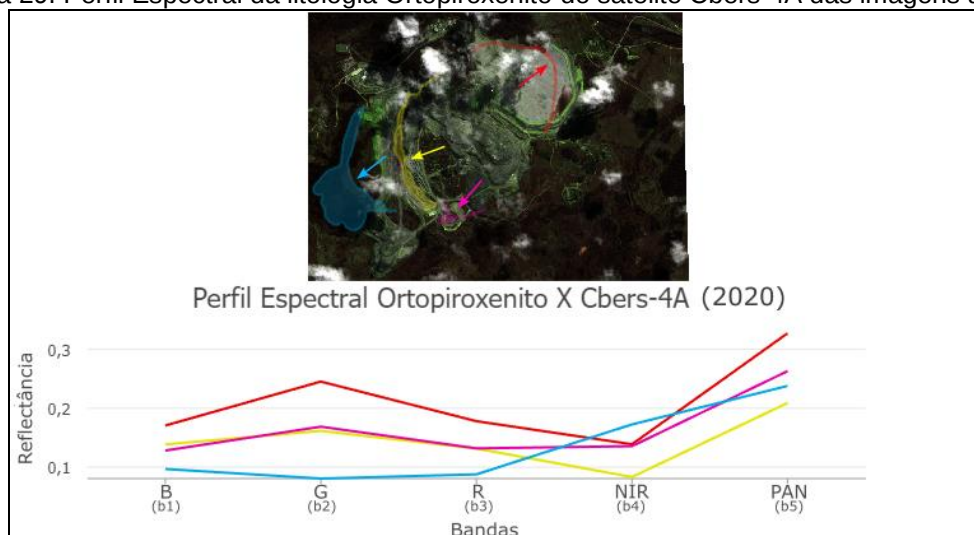
A maior diferença entre os satélites ainda se concentra nas respostas do CBERS-4A, haja vista que seus vales e picos diferem entre si e entre os outros sensores utilizados. Por outro lado, as respostas do Landsat 8 e Sentinel-2 seguem apresentando semelhanças.

7.2.3 Ortopiroxenito

O litotipo ortopiroxenito é presente em quatro porções da mina, uma a nordeste e as outras três a sudoeste. Devido às diferentes ocorrências, foram criados quatro perfis, respectivos às quatro porções da litologia.

Para o satélite CBERS-4A foram identificados valores de 0-0,40. A porção nordeste (vermelha) na imagem antiga (Figura 29) possui pico na banda b1 e um alto valor na banda b5, enquanto seu vale se concentra na b4. A porção sudoeste, de cor amarela, corresponde à mesma configuração da porção nordeste, variando apenas seus valores, que são menores. A porção mais ao sul (rosa), segue as mesmas respostas que as anteriores, tendo como mudança apenas o seu valor, que fica intermediário referente as porções nordeste e sudoeste. A porção mais a oeste (azul), possui um vale na b2 e, diferentemente das outras porções da litologia, seus valores mais altos também se concentram nas bandas b4 e b5; além disso, apresenta pequenos picos nas b1 e b3.

Figura 29. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Cbers-4A das imagens antigas.

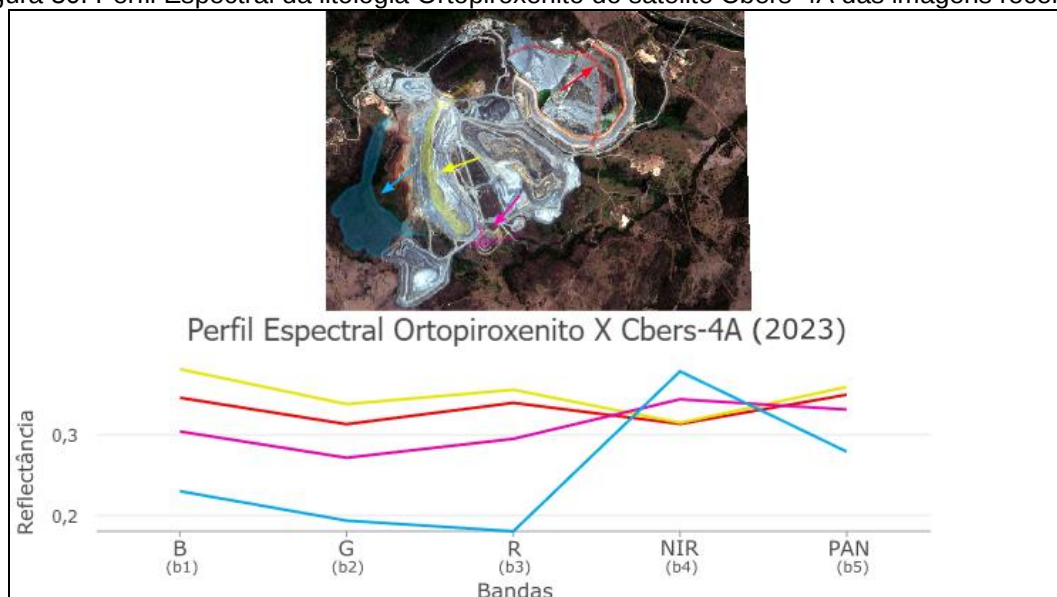


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Já na imagem recente (Figura 30), a porção vermelha tem seus picos nas bandas b1, b3 e b5 e seu vale também se encontra na banda b4. Na porção amarela, também ocorre a mesma apresentação de dados, porém com valores superiores aos da cor vermelha. Já a porção mais ao sul (rosa) segue as mesmas respostas que as anteriores, sendo que sua maior discrepância se encontra na b4, que se caracteriza por um pico, e na b5, que possui uma queda em seu valor. Enquanto isso, a porção azul segue a mesma característica das bandas RGB que as outras, porém com um valor bem mais baixo e, assim como a porção rosa, apresenta um pico na banda b4 e uma queda na banda b5.

A porção azul e rosa apresentam as curvas de assinaturas espectrais mais distintas entre si e entre as outras duas, o que pode ser atribuído à cobertura do solo presente na superfície. Nas composições em cores reais, é possível observar que a região ainda conserva mata nativa, o que justifica a leve absorção na b3 e a alta reflectância na b5, características típicas das interações da radiação eletromagnética com áreas vegetadas (YANG *et al.*, 2012).

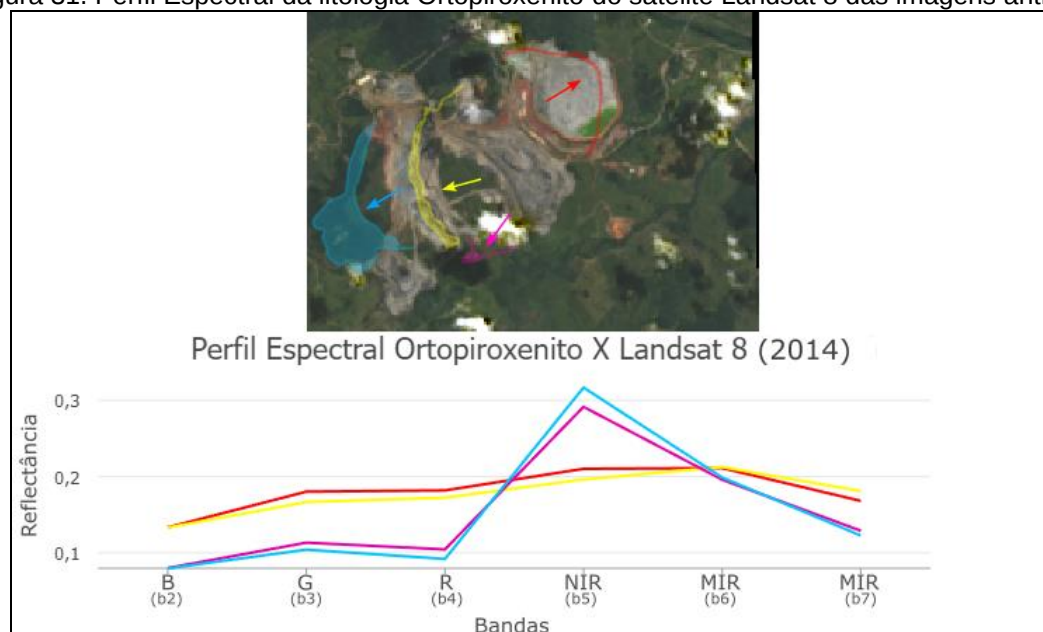
Figura 30. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Cbers-4A das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

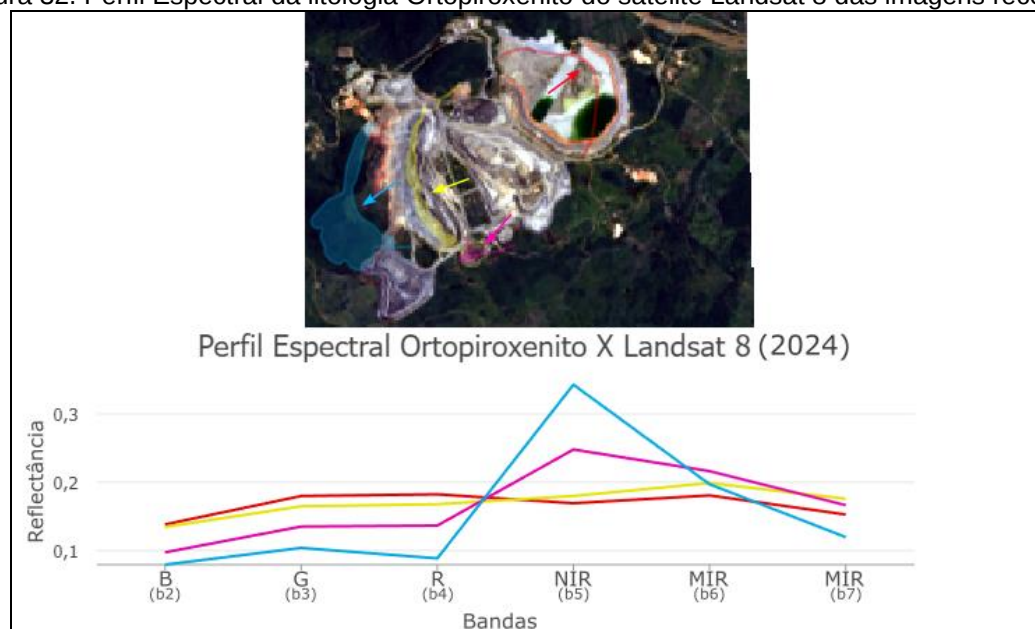
As respostas do Landsat 8 correspondem a valores de 0-0,35. Na imagem antiga (Figura 31), as porções vermelha e amarela apresentam respostas similares em todas as bandas, ao passo que as porções azul e rosa apresentam também o mesmo comportamento, com uma absorção de energia na b3 e pico de refletância na b4 – comportamento compatível com a presença de vegetação. Na imagem mais recente (Figura 32), embora haja diferenças sutis nos valores de reflectância, os comportamentos dos perfis espectrais seguem o mesmo padrão. Dessa forma, as curvas de assinatura espectral das áreas amarelas e vermelhas são as mais representativas do litotipo, onde há pouca ou nenhuma influência de outros elementos da superfície.

Figura 31. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 32. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.



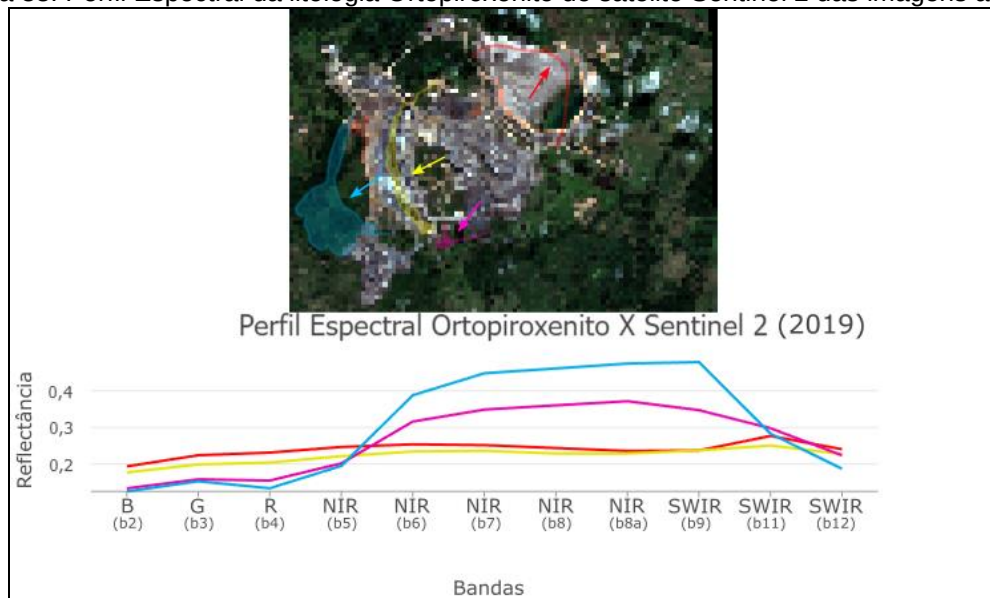
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para o Sentinel-2, os valores vão de 0-0,50. Nas imagens antigas (Figura 33) as porções vermelha e amarela possuem respostas bem homogêneas na maioria das bandas (b1 até b9), com apenas um pico na b11. Já a porção mais ao sul, apresenta picos nas bandas b2, b6 e b8 e vales nas b2, b4 e b12. A porção mais ao sudoeste

(azul) segue a porção rosa, porém seus valores são maiores a partir da banda NIR (b5).

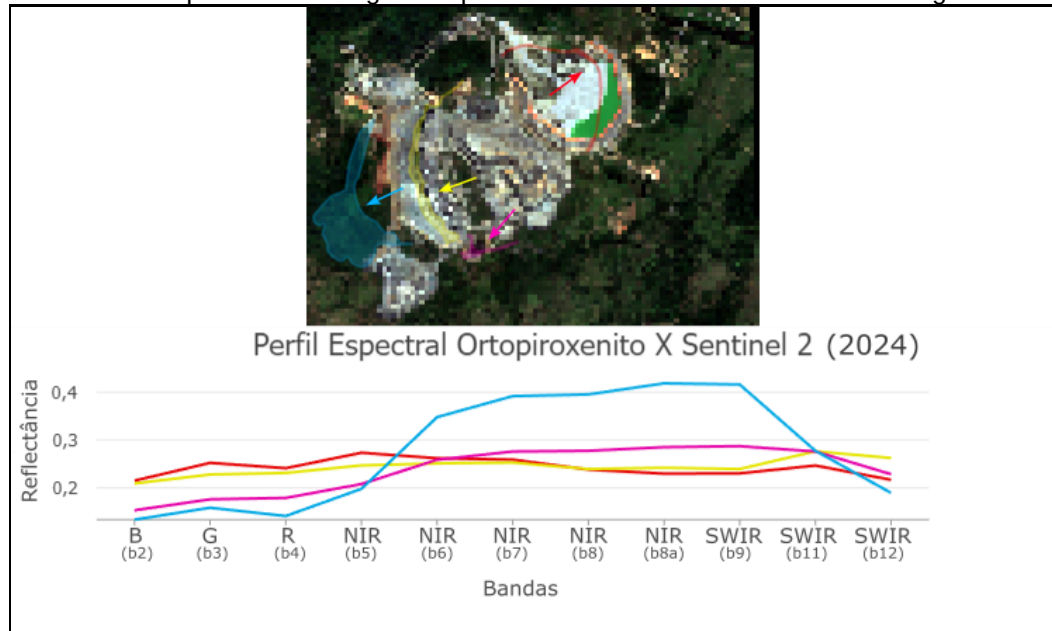
Na figura 34, a porção nordeste (cor vermelha) ganha maiores amplitudes, apresentando picos na b2, NIR (b5 e b7) e SWIR (b11) e vales nas b1, b3, b8 e SWIR (b12). A porção sudoeste (cor amarela) permanece com as mesmas características da imagem antiga, exceto pela queda das bandas NIR (b8 e b8a) e SWIR (b9), além de maiores valores a partir da banda NIR (b7). A porção sul (cor rosa), também segue a imagem antiga, porém com seus valores menores, principalmente a partir da banda NIR (b6). Por último, a porção azul (mais sudoeste) encontra-se com registros bem semelhantes às da imagem antiga, com as diferenças de valores menores e ainda menor na banda NIR (b8), caracterizando um pequeno vale.

Figura 33. Perfil Espectral da litologia Ortopiroxenito do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 34. Perfil Espectral da litologia Ortapiroxenito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.

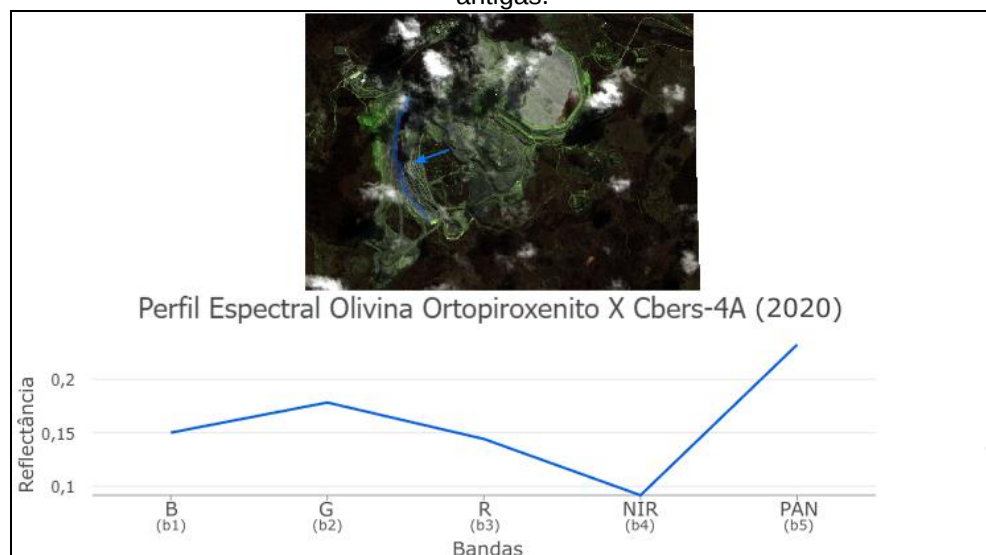


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

7.2.4 Perfis Espectrais Olivina Ortapiroxenito

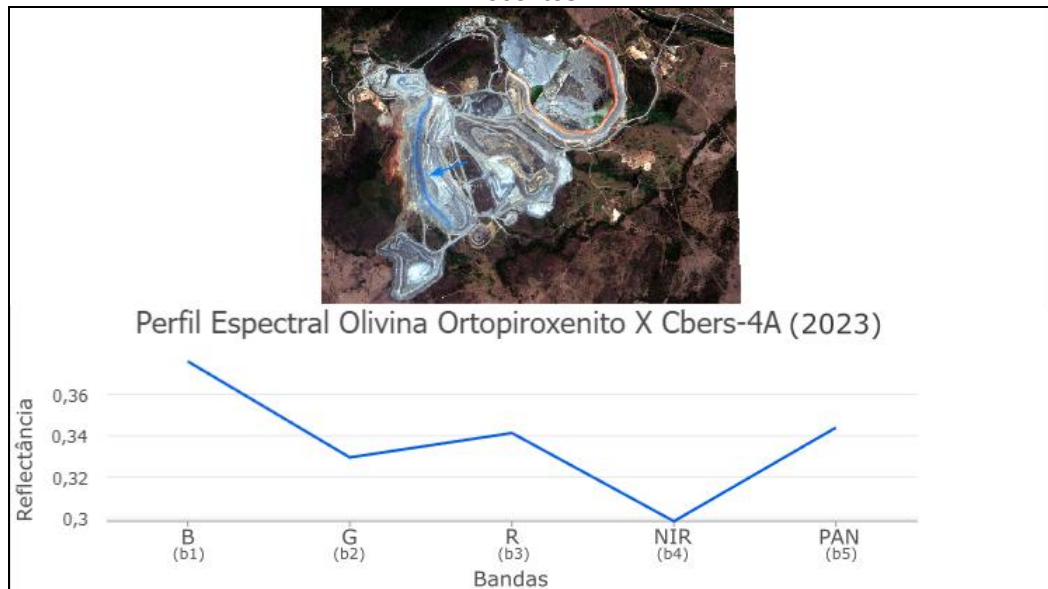
Nesse litotipo, o satélite CBERS-4A corresponde a valores entre 0-0,37. Na imagem antiga, seu pico se dá na b2 e a b5 é marcada pelo valor mais alto; já seu vale é demarcado pela banda NIR (Figura 35). Diferentemente da anterior, a imagem recente possui seu pico registrado pela b3 e o valor mais alto na b1 e seus vales são na b2 e b4, sendo esse último o mais expressivo (Figura 36).

Figura 35. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortapiroxenito do satélite Cbers-4A das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

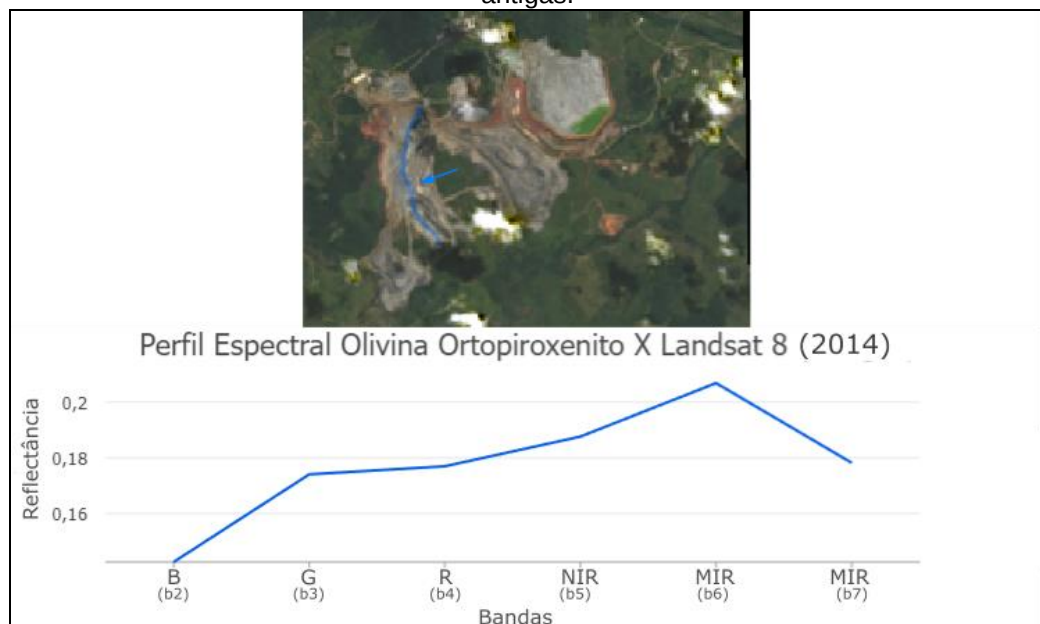
Figura 36. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Cbers-4A das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

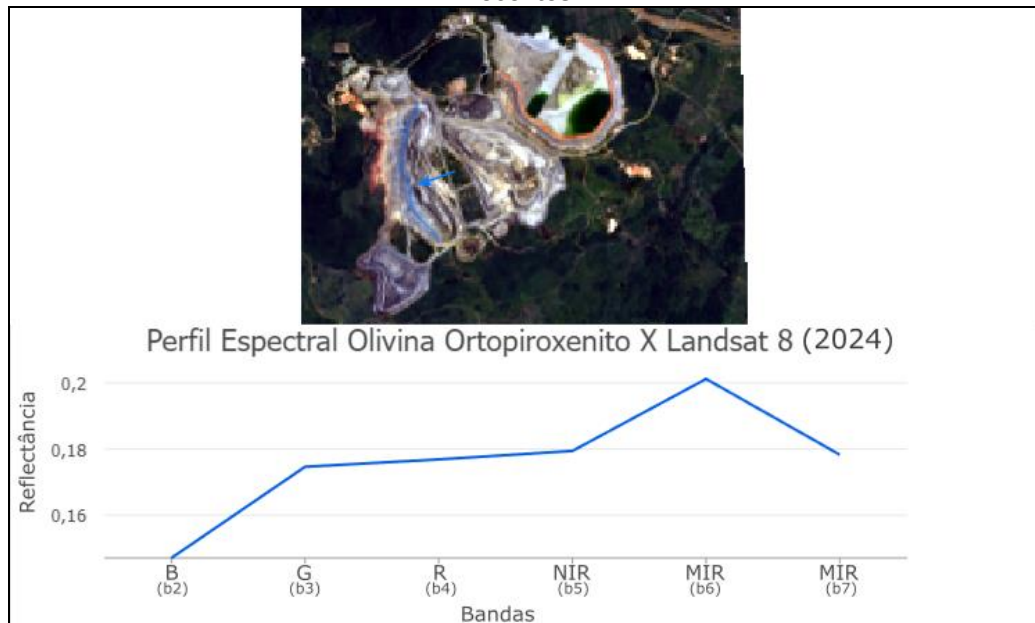
Já as respostas do Landsat 8 caracterizam valores de 0-0,21, onde na imagem antiga seu pico corresponde a b6 e os vales nas bandas NIR e MIR (b5 e b7, respectivamente), além do valor mais baixo apresentar-se na b2 (Figura 37). A imagem mais recente segue a mesma configuração, variando apenas na b5, onde na antiga seu valor é um pouco menor (Figura 38).

Figura 37. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

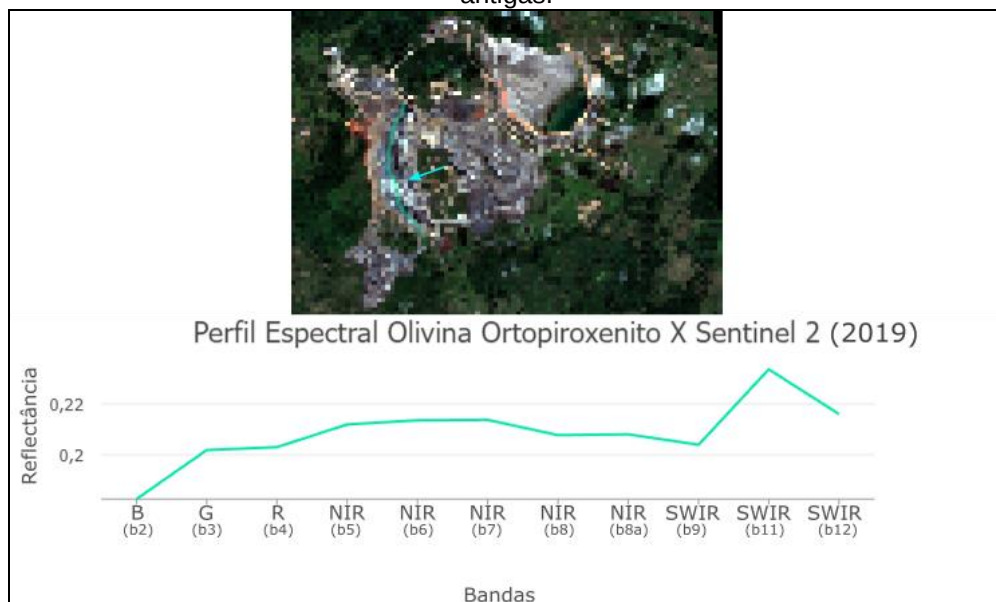
Figura 38. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

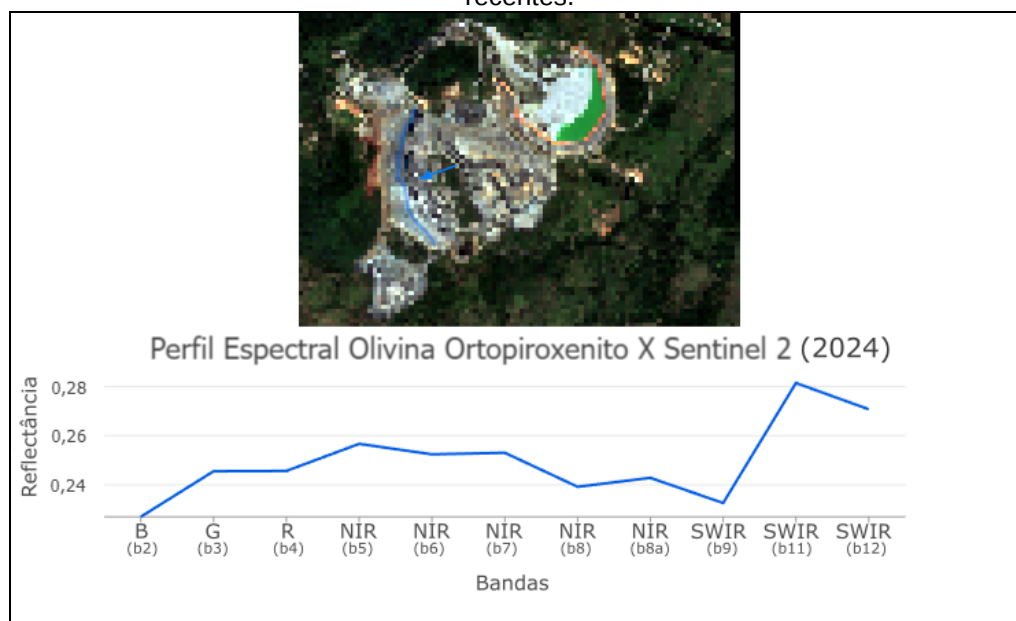
Para o satélite Sentinel-2, os valores variam de 0-0,29 entre as imagens antiga e recente. Com a imagem antiga há pequenos picos nas bandas NIR (b5, b7 e b8a) e um mais expressivo na banda SWIR (b11) (Figura 39), enquanto há pequenos vales nas bandas R, NIR (b8) e SWIR (b9) e a banda b2 é a que possui o menor valor. A imagem recente possui o mesmo padrão, o que difere são seus valores maiores e as maiores amplitudes entre vales e picos, principalmente ao que diz respeito a banda SWIR (b11) (Figura 40), além de um outro pequeno vale na banda NIR (b6).

Figura 39. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 40. Perfil Espectral da litologia Olivina Ortopiroxenito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Observando o panorama geral do litotipo, é notável que as respostas dos satélites foram mais divergentes que nas outras litologias. O CBERS-4A segue sendo diferente até mesmo entre suas próprias imagens tendo apenas uma ou outra resposta de banda semelhante (neste caso, bandas NIR e PAN), enquanto os outros dois mantêm um padrão entre as imagens antigas e recentes. Os satélites Landsat 8 e Sentinel-2 seguem a mesma tendência e nas composições de cor real é possível observar que não existem elementos na superfície representativos o suficiente para interferir nas assinaturas espectrais.

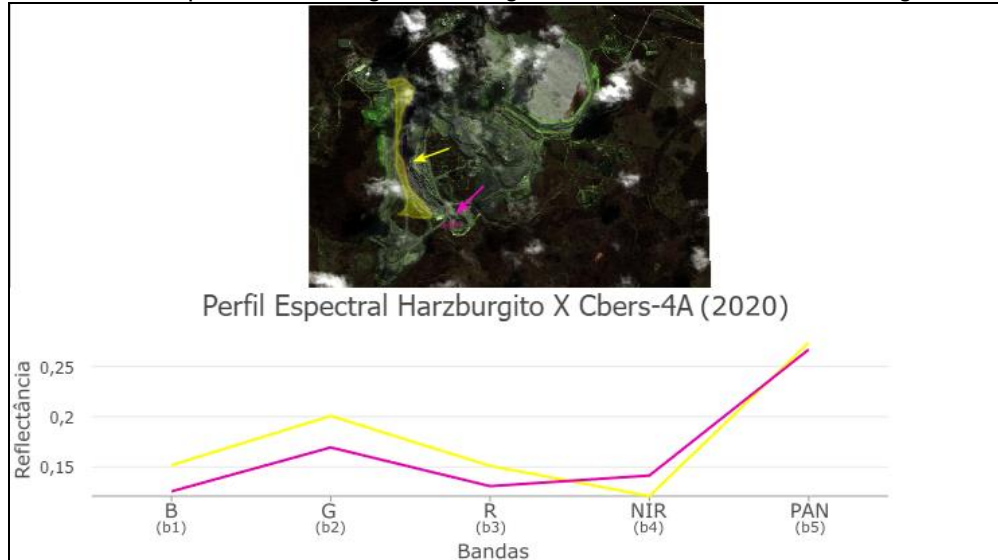
7.2.5 Perfis Espectrais Harzburgito

O harzburgito possui mais de uma porção mapeada na mina, uma a sudoeste e outra mais ao sul, por isso foram criados dois perfis espectrais. Com valores de 0-0,37, as imagens do CBERS-4A, possuem na imagem antiga, praticamente a mesma resposta para ambas as porções (Figura 41), mudando apenas o valor de cada resposta. Seu pico é na b2 e altos valores na b5, enquanto seus vales ficam nas bandas b1 e b4.

Já na imagem recente (Figura 42), os picos aparecem na porção sudoeste (amarelo), na b1 e b3, além de alto valor na b5; na porção sul (rosa) os picos são caracterizados pelas bandas b1 e b4, além de uma queda na b5. Os vales são

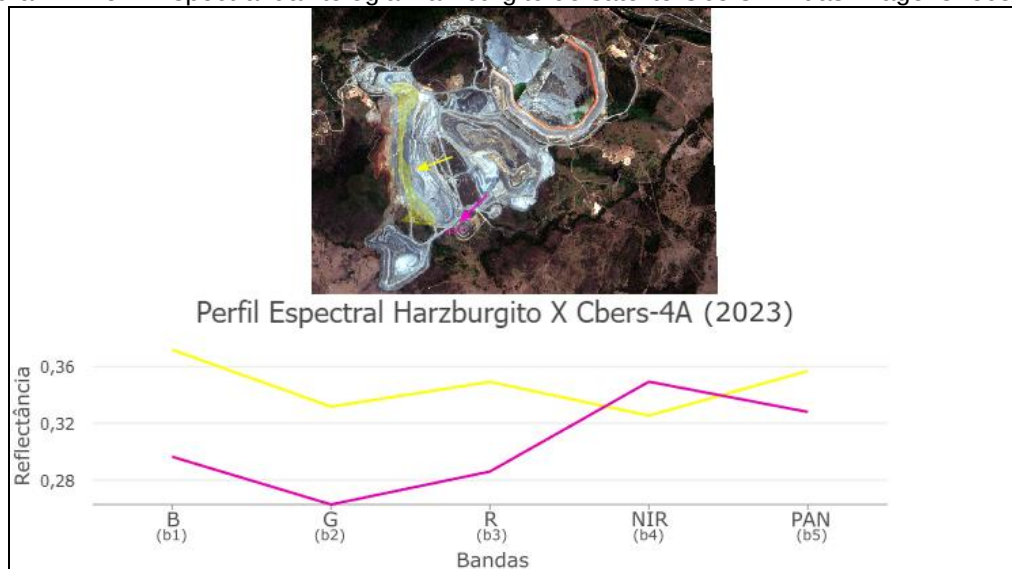
representados, na porção sudoeste (amarelo), pelas bandas b2 e b4, e na porção sul (rosa) pela banda b2 e queda nos valores da banda b3.

Figura 41. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Cbers-4A das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

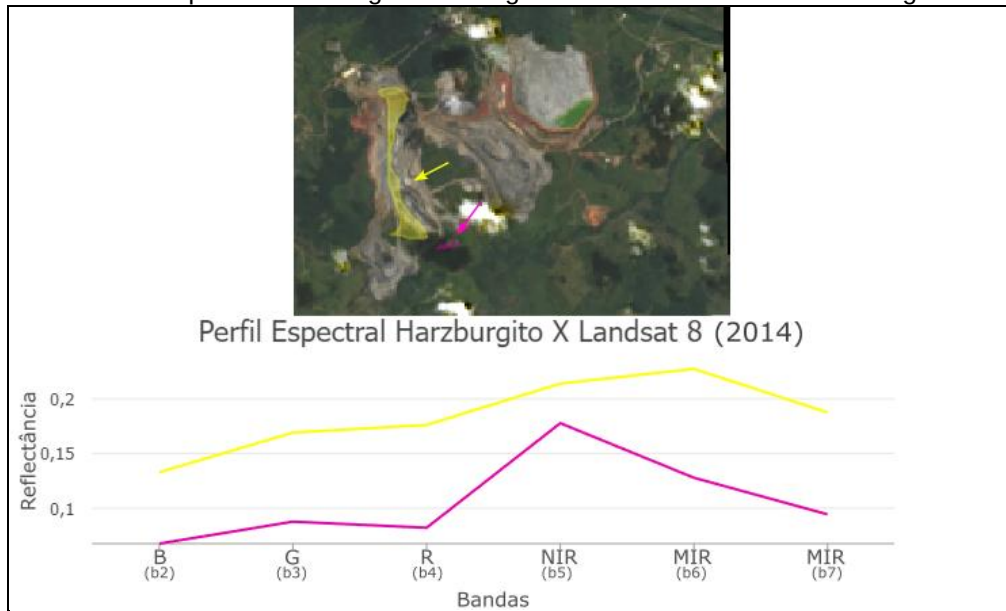
Figura 42. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Cbers-4A das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

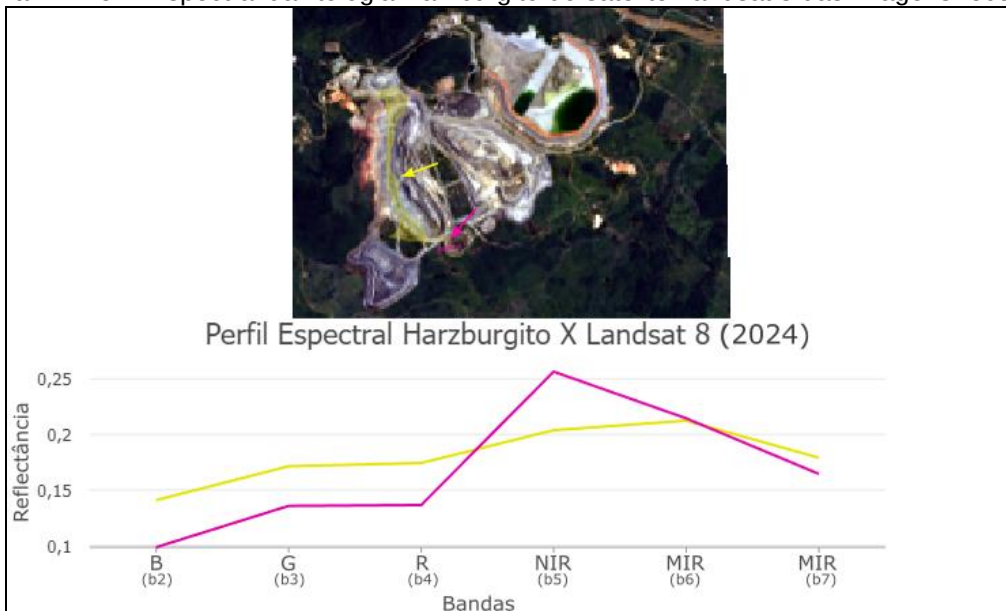
Nas imagens do Landsat 8, os valores variam de 0-0,25 e tanto a antiga como a recente (Figuras 43 e 44) são muito semelhantes quanto às suas características. Na porção sudoeste (amarela) e na porção sul (rosa), as imagens apresentam picos nas bandas b3 e b5 e vales nas bandas b2, b4 e b7.

Figura 43. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 44. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.

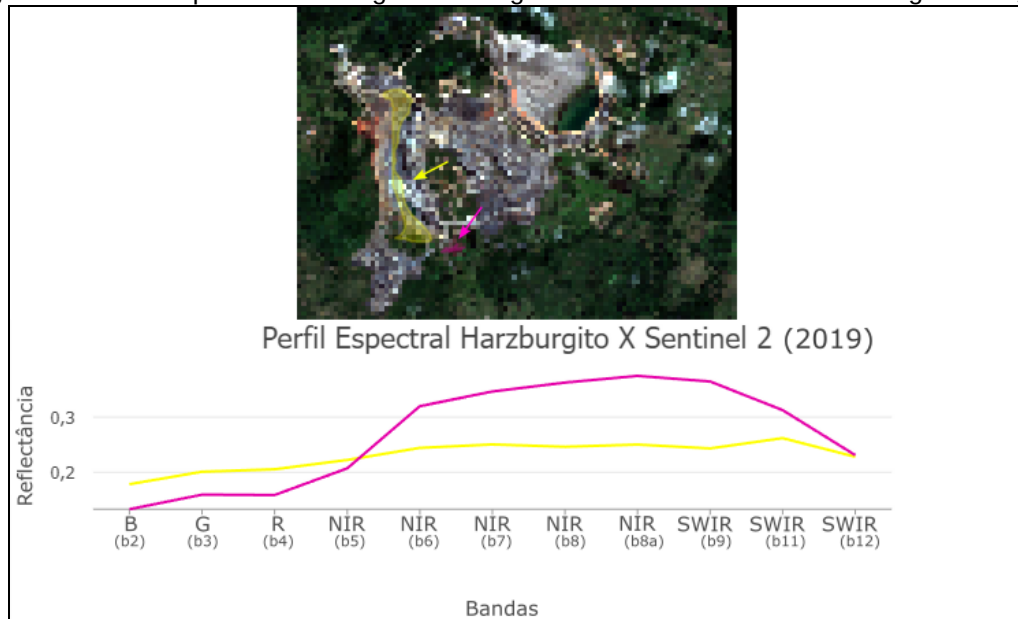


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

As assinaturas do Sentinel-2 apresentam valores de 0-0,40. As antigas (Figura 45) apresentam, na porção sudoeste (cor amarela), picos nas bandas b3, b6 e SWIR (b11); e vales nas bandas b2, b4 e SWIR (b9 e b12). Na porção sul (rosa) há picos nas bandas b2, NIR (b6 e b8a) e SWIR (b9), enquanto seus vales se refletem nas bandas B, R e SWIR (b11). Na imagem recente do Sentinel-2 (Figura 46), a porção sudoeste possui picos nas bandas b3, NIR (b6) e SWIR (b9); seus vales nas bandas b2, b4, NIR (b8), SWIR (b9 e b12). A porção mais ao sul (rosa) apresenta picos nas

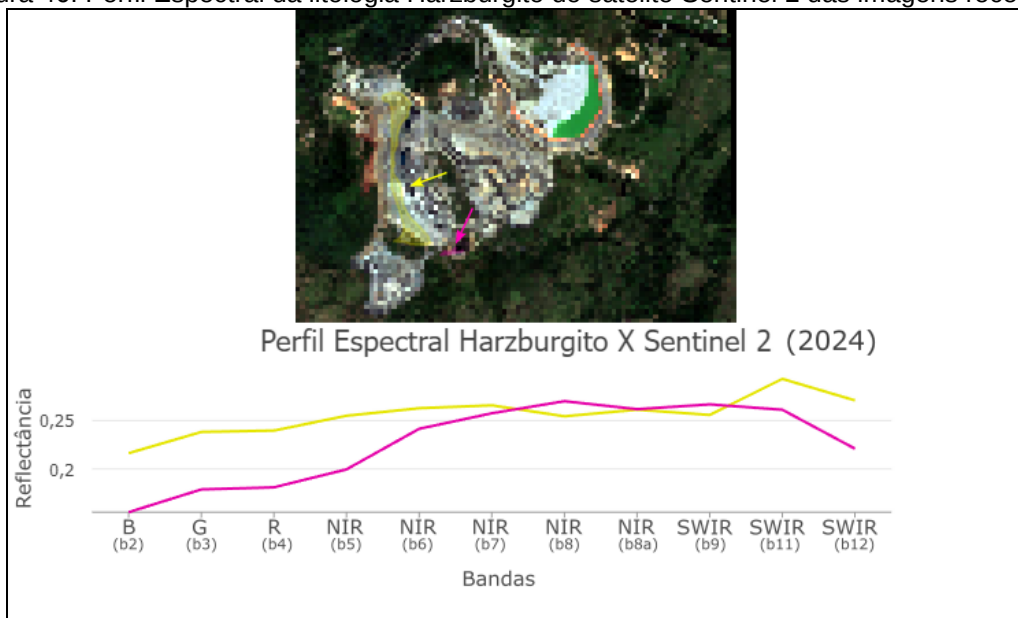
bandas b3, NIR (b6 e b8) e SWIR (b9 e b11) e vales nas bandas b1, b3, NIR (b8a) e SWIR (b12).

Figura 45. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 46. Perfil Espectral da litologia Harzburgito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

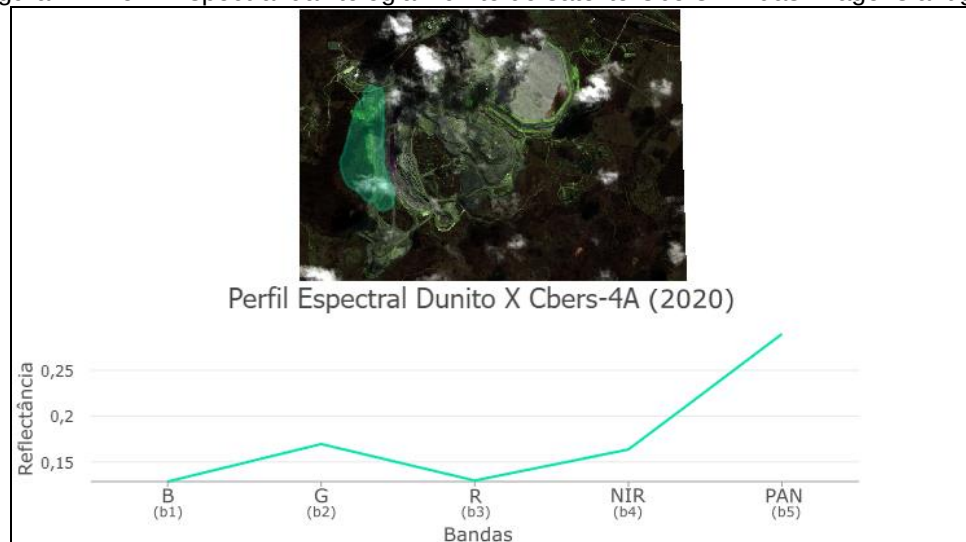
De forma geral, é possível notar a constante inversão dos picos e vales das imagens CBERS-4A, enquanto as dos outros satélites tendem a variar bem menos, isso quando não são bem semelhantes. Outrossim, as imagens do Landsat e Sentinel-

2 seguem tendo semelhanças entre si, o que possibilita inferir que a assinatura espectral do Harzburgito pode ser coletada.

7.2.6 Perfis Espectrais Dunito

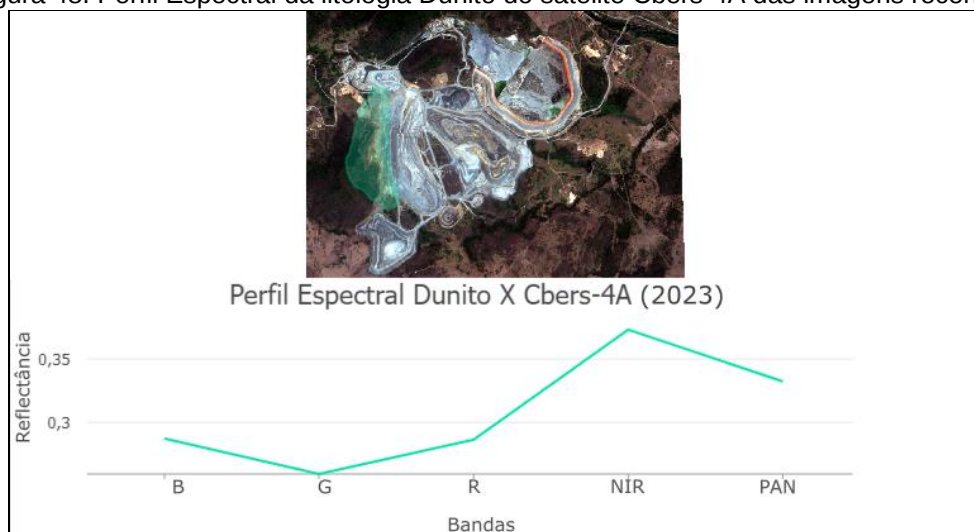
O litotipo dunito teve como resposta do CBERS-4A valores entre 0-0,38. A imagem antiga é caracterizada com pico nas bandas b2 e b4 e a resposta mais alta da banda PAN (Figura 47). Na imagem recente, a única diferença proeminente na assinatura espectral foi na b2, que se tornou um vale (Figura 48) – as imagens mais recentes são mais representativas pois o litotipo apresenta maior exposição.

Figura 47. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Cbers-4A das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

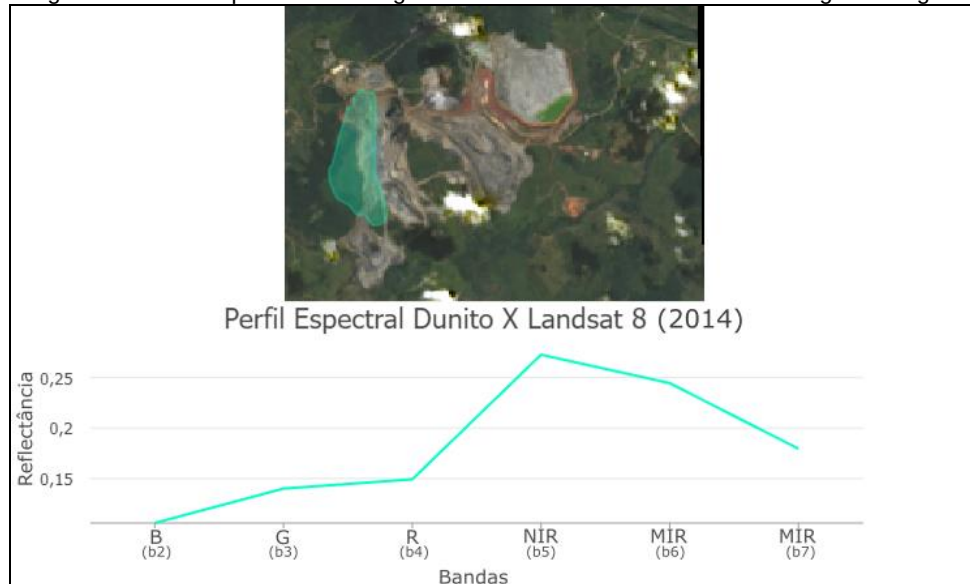
Figura 48. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Cbers-4A das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

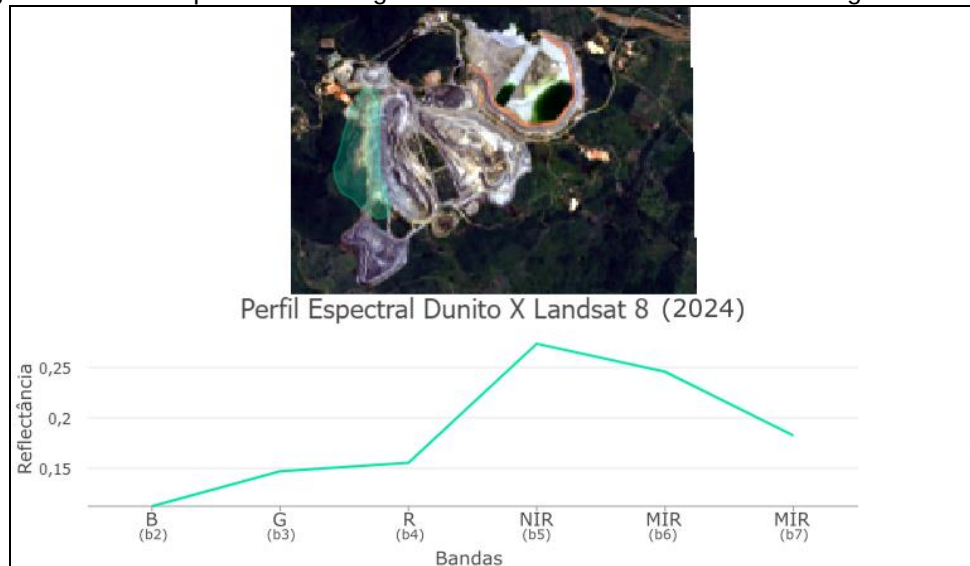
Para o satélite Landsat 8 os valores ficam no entorno de 0-0,21 para ambos os imageamentos (Figuras 49 e 50), contendo um pico na banda b5 e vales nas bandas b3 e MIR (b7), além do valor mais baixo na banda b2.

Figura 49. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Landsat 8 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

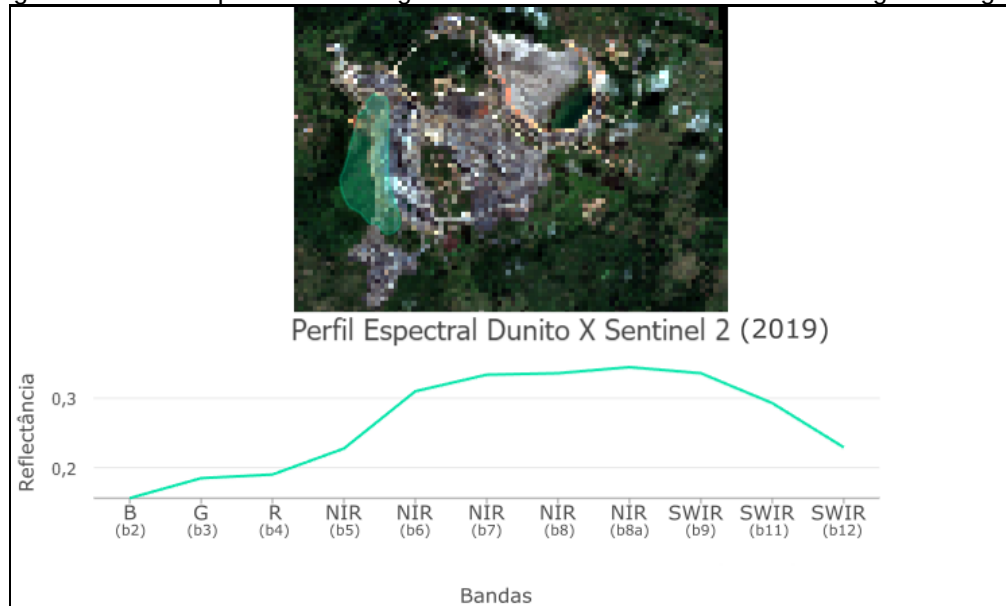
Figura 50. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Landsat 8 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

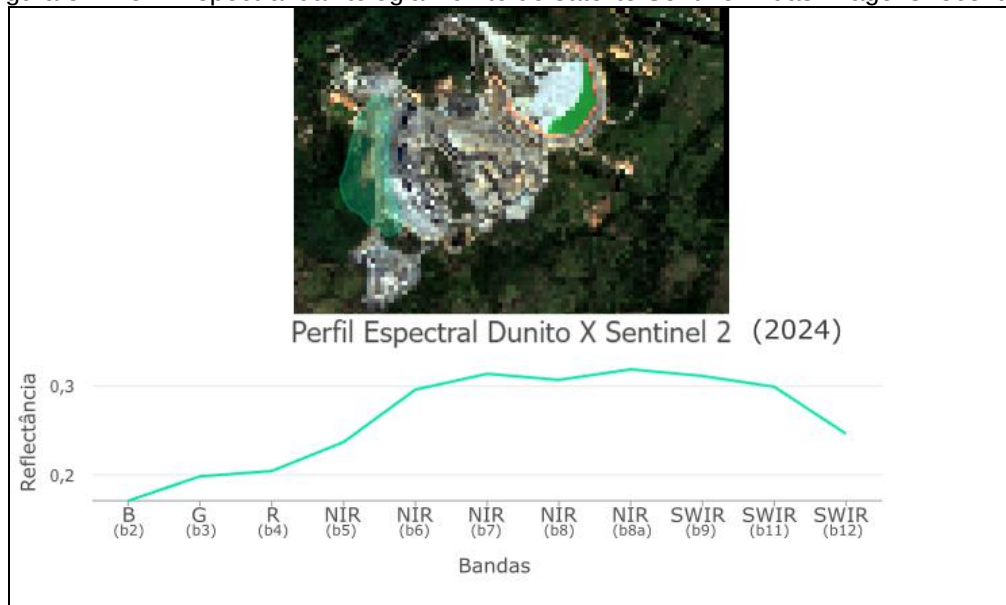
Os imageamentos do Sentinel-2 também se apresentam semelhantes (Figuras 51 e 52), com valores de 0-0,40, picos nas bandas b3 e NIR (b7 e b8a) e vales nas bandas b4, SWIR (b12) e o menor valor na banda b2. A única diferença notável da imagem mais recente é uma queda no valor da banda NIR (b8).

Figura 51. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 52. Perfil Espectral da litologia Dunito do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os perfis espectrais do litotipo dunito foram os mais homogêneos nas respostas obtidas. A banda B foi a de menor valor em todos os satélites, exceto a imagem recente do CBERS 4A e os picos foram na banda NIR em todas as imagens. Com isso, podemos identificar que o litotipo dunito apresenta uma boa resposta às assinaturas espectrais na localidade.

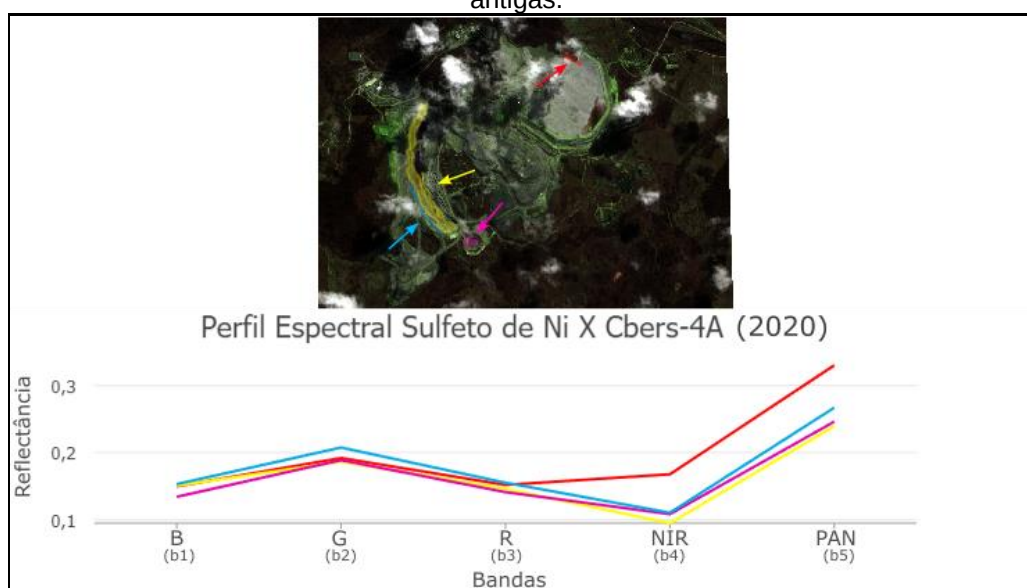
7.2.7 Mineralização de Sulfeto de Ni

A mineralização de sulfeto de Ni também se apresenta em quatro porções da mina, uma a nordeste e as outras três a sudoeste, consequentemente, foram criados quatro perfis, respectivos às porções da litologia.

O satélite CBERS-4A conta com valores de 0-0,38. Na imagem antiga, a porção nordeste (cor vermelha) possui pico na banda b2 e alto valor na banda PAN, além de vales na banda b1 e b4. Todas as outras porções (amarela, rosa e azul) também acompanham as mesmas respostas da porção nordeste, mudando apenas, os valores de cada uma (Figura 53). Entretanto, é possível identificar a influência da vegetação no perfil espectral.

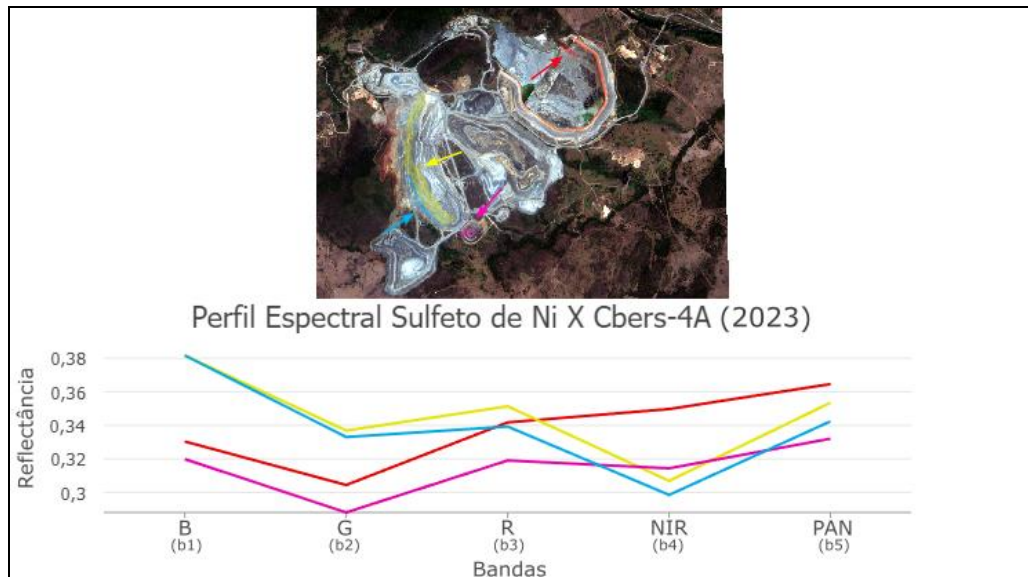
Na imagem recente (Figura 54) a porção nordeste (vermelha) contém um pico na banda b3 e altos valores na banda PAN e um vale na banda b2, bem como a porção mais ao sul (rosa), mas com valores menores. A porção sudoeste (amarela) possui picos na banda b1, b3 e PAN e vales nas bandas b2 e b4. A porção sudoeste de cor azul acompanha a anterior, tendo apenas valores menores. Os altos valores de reflectância na b1 indicam uma assinatura particular, raramente observada nos litotipos da intrusão. Para o satélite CBERS-4A o pico na banda B pode ser um marcador bastante importante na identificação de áreas mineralizadas de Ni.

Figura 53. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Cbers-4A das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 54. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Cbers-4A das imagens recentes.

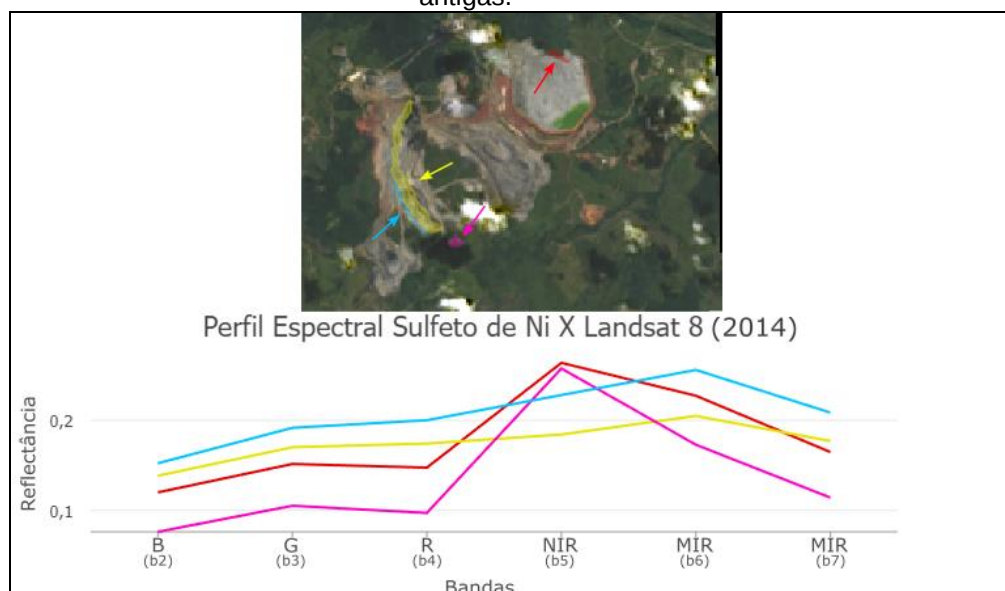


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para as imagens do Landsat 8, os valores de reflectância variam de 0-0,30. Nas imagens antigas, a porção nordeste é definida com picos nas bandas b3 e b5 e vales nas bandas b2, b4 e MIR (b7) (Figura 55). A porção mais ao sul (rosa) segue o mesmo padrão da porção adjacente, porém com menores valores, principalmente na banda MIR (b6). Já as porções a sudoeste (amarela e azul) apresentam picos na banda b3 e MIR (b6), enquanto os vales se encontram nas bandas b2, b3 e MIR (b7), tendo como diferença os valores de cada porção.

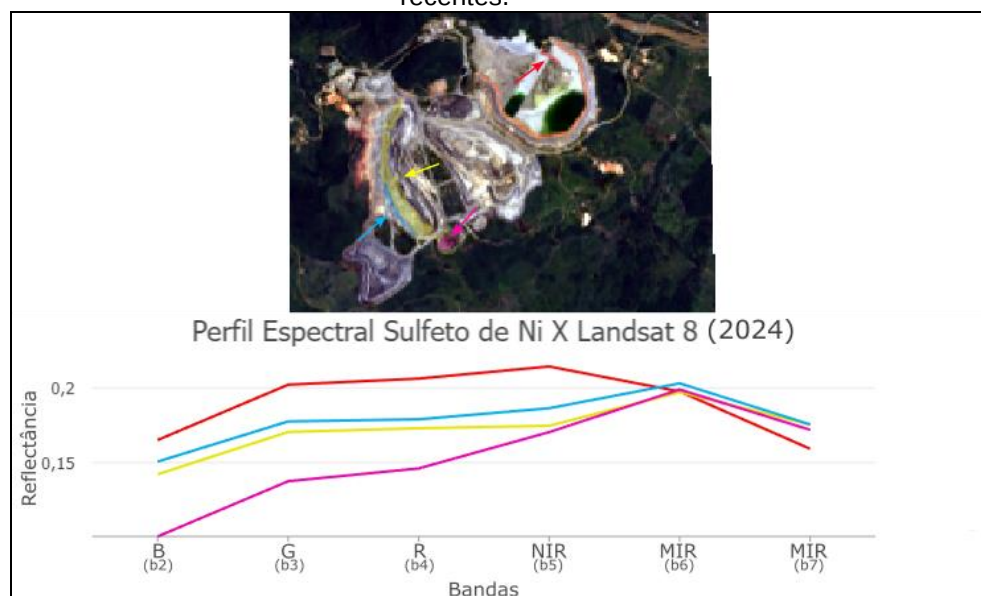
Já a imagem recente (Figura 56) é um pouco mais homogênea nas respostas das porções, contando com picos nas bandas b3 e MIR (6). As respostas são bastante homogêneas e indicam uma boa possibilidade de identificação da assinatura espectral.

Figura 55. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Landsat 8 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 56. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Landsat 8 das imagens recentes.



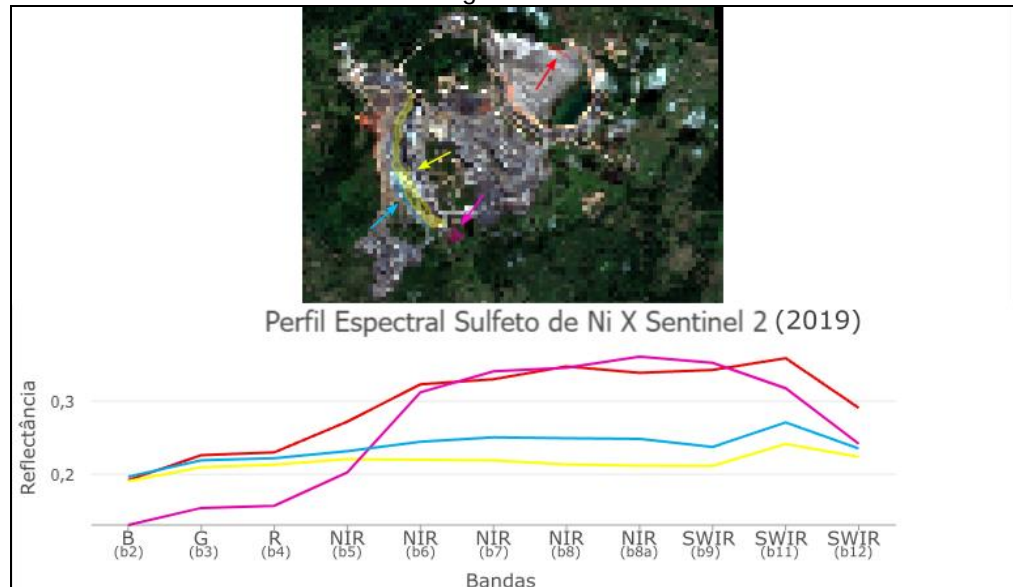
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Nas imagens do Sentinel-2, os valores se encontram entre 0-0,40. A mais antiga (Figura 57), na porção nordeste (cor vermelha), possui picos nas bandas b3, NIR (b6 e b8) e SWIR (b11); e vales nas bandas b2, b4, NIR (b7 e b8a) e SWIR (b12). As porções a sudoeste (cores amarelo e azul), seguem as mesmas respostas, com valores diferentes.

Enquanto na imagem recente (Figura 58), a porção nordeste (vermelha) apresenta-se da mesma forma que a imagem antiga, porém com valores abaixo dos

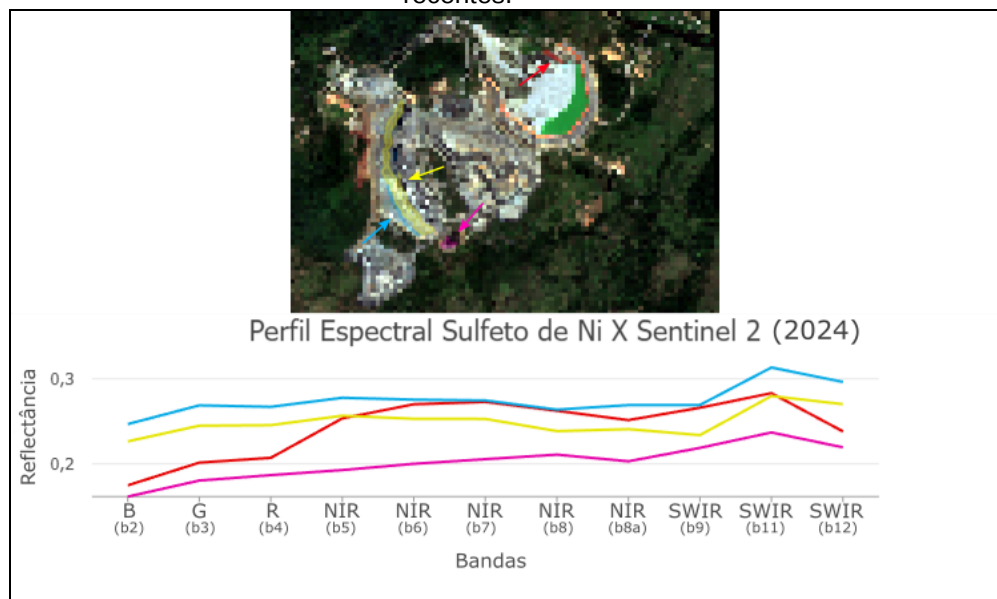
anteriores. As porções a sudoeste (amarela e azul) também se mantêm semelhantes a imagem antiga, apenas tendo uma queda no valor da banda NIR (b8) e aumento na banda SWIR (b12). A porção sul foi a que mais teve alterações, principalmente nos seus valores que ficaram muito baixos; com picos na banda b3 e NIR (b8), SWIR (b11) e vales nas bandas b2 e NIR (b8a).

Figura 57. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 58. Perfil Espectral da Mineralização de Sulfeto de Ni do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.

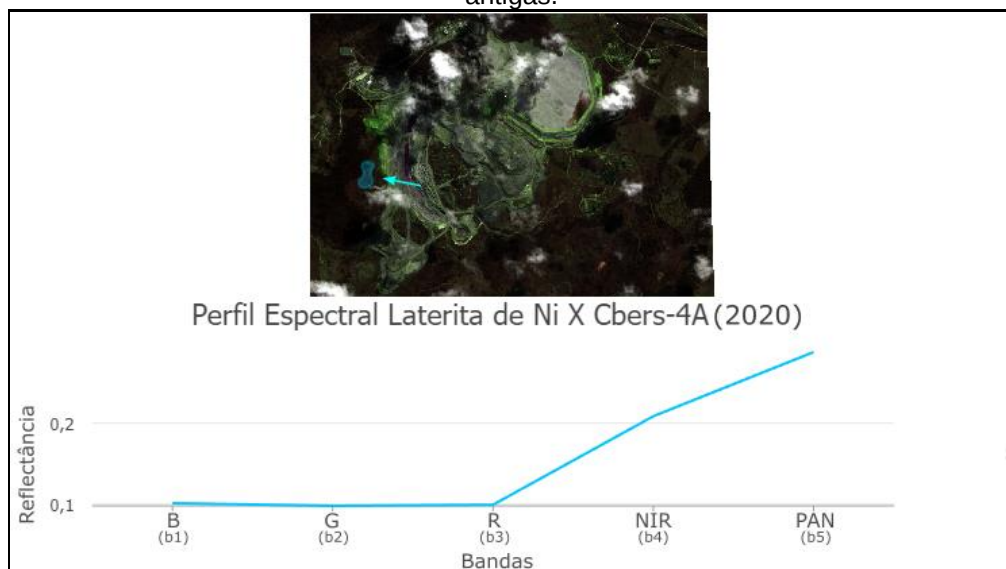


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

7.2.8 Perfis Espectrais Mineralização de Laterita de Ni

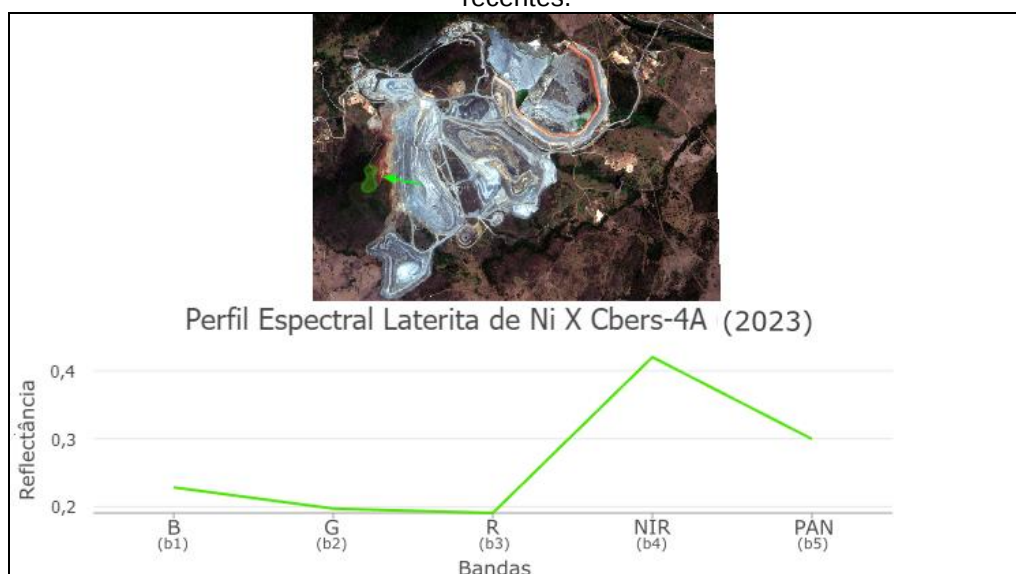
Para a laterita de Ni, as respostas do CBERS-4A tiveram valores entre 0-0,42. A imagem antiga obteve seus picos na banda NIR e o valor mais alto segue sendo na banda PAN. Seus vales concentram-se nos baixos valores do RGB, com reflectância de 0,10 (Figura 59). Já na imagem recente seu pico segue na banda b4 e a banda b1 apresenta um valor um pouco maior. Os valores mais baixos se encontram nas bandas b2 e b3, além de uma queda na PAN (Figura 60). São assinaturas compatíveis com a presença de vegetação.

Figura 59. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Cbers-4A das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 60. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Cbers-4A das imagens recentes.

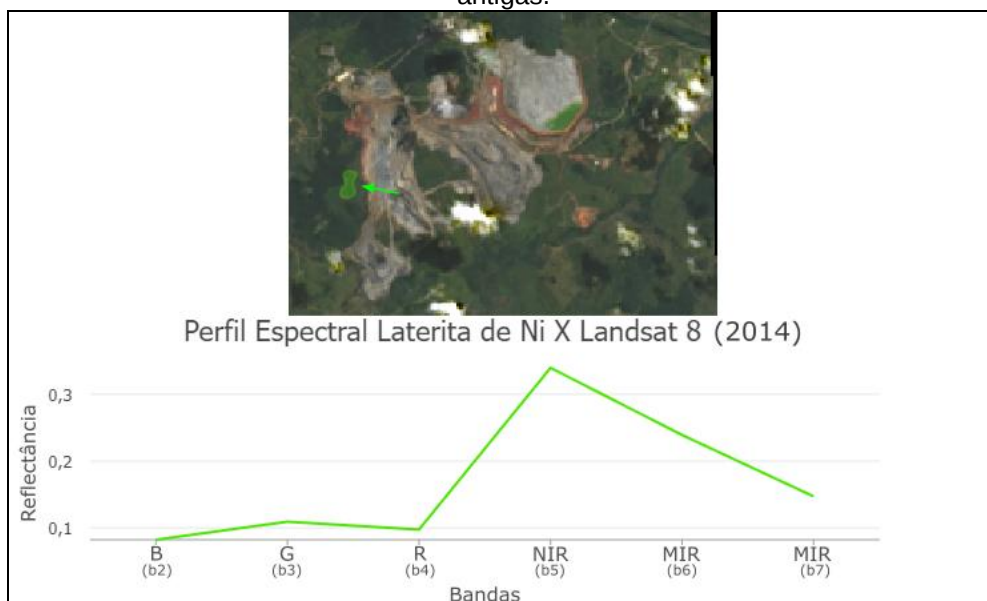


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ambas as imagens do Landsat 8 registraram valores de 0-0,35 (Figuras 61 e 62), picos na banda NIR e banda G e vales nas bandas B e R. E assim como o satélite anterior, as do Sentinel-2 apresentaram a mesma resposta para as imagens antigas e recentes (imagem 63 e 64), com valores entre 0-0,50, picos nas bandas G, NIR (b6, b7 e b8a) e SWIR (b9) e vales nas bandas B e R. Com apenas um valor menor na banda NIR (b8), caracterizando um vale pequeno e valores um pouco mais baixos de maneira geral na imagem mais recente (com uma máxima de aproximadamente 0,41).

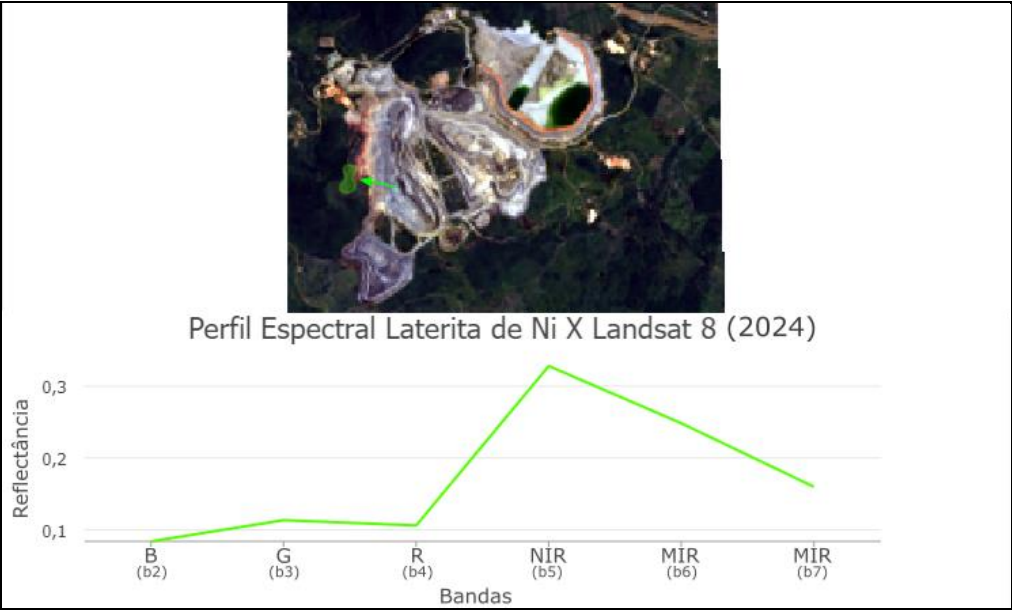
Assim como a litologia dunito, a laterita (que se encontra inserida na ultramáfica) possui respostas bem homogêneas e semelhantes entre os satélites. Todas as imagens tiveram altas respostas nas bandas NIR e baixas respostas no RGB, sendo ainda mais próximos os resultados dos satélites Landsat 8 e Sentinel-2. A única diferença notável foi a dos valores de reflectância dos satélites, que se encontram mais distantes, com seus máximos variando de 0,35-0,50. A laterita também apresenta perfis espectrais bem definidos entre os satélites, o que possibilita identificar a assinatura espectral bem definida da lateria – um importante guia prospectivo.

Figura 61. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Landsat 8 das imagens antigas.



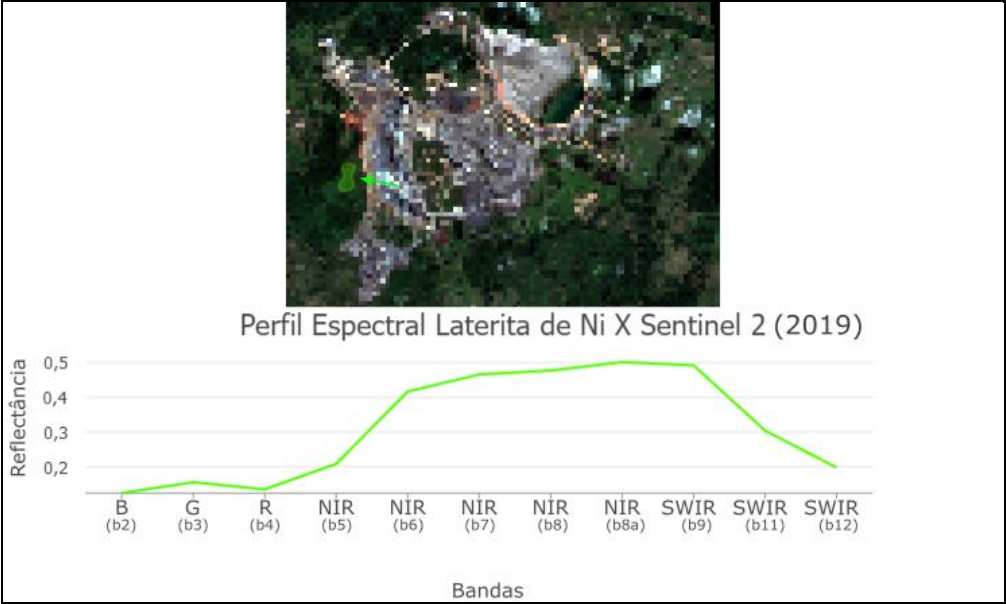
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 62. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Landsat 8 das imagens recentes.



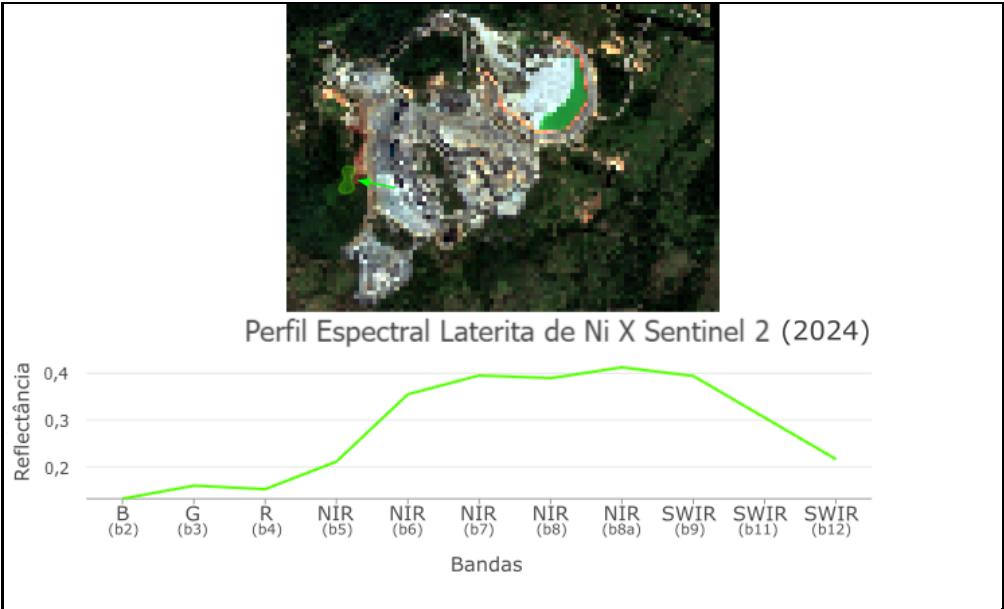
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 63. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Sentinel 2 das imagens antigas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 64. Perfil Espectral da Mineralização de Laterita de Ni do satélite Sentinel 2 das imagens recentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

8. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos e das análises realizadas ao longo deste trabalho, é possível afirmar que o Sensoriamento Remoto demonstrou ser uma ferramenta viável e funcional, uma vez que foi capaz de trazer novas informações relevantes para o Depósito de Santa Rita.

O satélite CBERS-4A apresenta excelente potencial para análises espectrais do território brasileiro, possibilitando avaliações rápidas e versáteis de alvos pequenos, como os litotipos mapeados. Apesar desse potencial, dois desafios são apontados neste estudo. O primeiro é a inexistência ou falta de registro científico sobre técnicas de correção radiométrica para os dados do satélite. O segundo desafio é a presença de nuvens em muitas imagens, o que indica a necessidade de uma constelação de satélites brasileiros mais bem desenvolvida, com tempos de revisitação menores — ou seja, imagens adquiridas com maior frequência no território. As mineralizações de Ni apresentaram picos na banda 1 (azul) do CBERS-4A em imagens mais recentes, indicando uma reflectância bastante específica, quando comparada aos demais litotipos mapeados.

Os satélites Landsat 8 e Sentinel-2, por sua vez, apresentaram dados semelhantes interessantes nas assinaturas espectrais, o que evidencia uma excelente aplicação de dados multibanda para a identificação dos perfis espectrais dos diferentes litotipos.

As imagens mais recentes se mostraram mais vantajosas, provavelmente devido ao avanço da exploração das minas, que deixou as litologias mais expostas e diminuiu a interferência nos perfis espectrais de vegetação e outros elementos da superfície.

Todos os litotipos mostraram respostas espectrais consistentes, com correlação entre diferentes sensores e períodos, o que demonstra o potencial de reaplicação desta metodologia. As assinaturas espectrais podem, no futuro, ser usadas para a construção de guias prospectivos regionais e direcionar, de forma mais eficaz, a pesquisa mineral.

Por fim, este trabalho marca o início da análise espectral da região. É importante realizar uma atualização constante dos dados, até que se atinja uma consistência estatística significativa, a fim de gerar curvas de assinatura espectral

cada vez mais consolidadas e com menor interferência possível dos demais elementos da superfície terrestre.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERO ENGENHARIA, 2023. O que é *Layer Stacking* em Cartografia. Disponível em: <<https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-layer-stacking-em-cartografia/>>. Acesso em: 13/05/2024.

ABRAM, M.B., SILVA, M.G. 1992. O corpo máfico-ultramáfico da Fazenda Mirabela, Ipiaú-BA-Química Mineral, Litogeoquímica e Evolução Petrogenética. In: Congresso Brasileiro de Geologia 37", São Paulo, Brazil External Abstract SBG.1 pp. 449-450.

ABRAM, M. B. 1994. O corpo máfico-ultramáfico da Fazenda Mirabela Ipiaú-BA: caracterização petrográfica, geoquímica, tipologia e implicações metalogenéticas. 1994, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

ALIBERT C. & BARBOSA J.S.F. 1992. Âges U-Pb déterminés à la "SHRIMP" sur des zircons du Complex de Jequié, Craton du São Francisco, Bahia, Brésil. In: Réunion. Sci. Terre, Toulouse, France, 14:4

ALMEIDA, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, 7(4), p349-364.

ALVES DA SILVA F.C. & BARBOSA J.S.F. 1997. Evolução estrutural do cinturão granulítico do SE da Bahia: o exemplo da região de Ipiau. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 6, SBG - Núcleo Brasília, Pirenópolis, Goiás, Anais, 1: 241-243.

ANA (Agência Nacional de Águas), 2019. Trechos Rodoviários. Catálogo de Metadados da ANA. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ff37f924-e88d-4ee4-82e7-14a3e5efe0fd> Acesso em: 23 de abril de 2024.

APPIAN CAPITAL ADVISORY. Disponível em: <<https://appiancapitaladvisory.com/#intro>> Acesso em: 15 de março de 2024.

ARCANJO, J. B. A.; BARBOSA, J. S. F.; ALVES DA SILVA, F. C., 1998. O sensoriamento remoto como técnica auxiliar nos estudos geológicos da região de alto grau metamórfico de Ipiaú, Bahia. Instituto de Geociências, USP, n. 27, p. 99- 118.

ATLANTIC NICKEL. Disponível em: <<https://atlanticnickel.com>> Acesso em: 15 de março de 2024.

BARBOSA, J. 1986. Constitution lithologique et métamorphique de la région granulitique du sud de Bahia (Brésil) (Doctoral dissertation, Paris 6).

BARBOSA, J. S. F. 1990. The granulites of the Jequié Complex and Atlantic Coast Mobile Belt, Southern Bahia, Brazil - An expression of archaen early proterozoic plate convergence. In: VIELZEUF, D.; VIDAL, P. (Eds.). Granulites and Crustal Evolution. [S.l.]: Kluwer Academic, p. 195 - 221.

BARBOSA, J. S. F., & SABATÉ, P. 2003. Colagem paleoproterozoica de placas arqueanas do Cráton do São Francisco na Bahia.

BARBOSA, J. S. F., & SABATÉ, P. 2004. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. *Precambrian Research*, 133(1-2), 1-27.

BARBOSA, J. S. F., CORREA-GOMES, L. C., MARINHO, M. M., & SILVA, F. C. A. D. 2003. Geologia do segmento sul do orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá. Repositório UFBA.

BARNES, S.-J. 1986. "The effect of metamorphism on the platinum-group element content of the UG-2 chromitite layer of the Bushveld Complex." *Economic Geology* 81: 934-941.

BARNES, S.-J., & P. C. LIGHTFOOT 2005. "The formation of magmatic nickel-copper-platinum-group element sulfide deposits." In *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Edited by J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, and J. P. Richards. Society of Economic Geologists, Littleton, CO, USA. Pp. 1143-1173.

BARNES, S. J., CRUDEN, A. R., ARNDT, N., & SAUMUR, B. M. 2016. The mineral system approach applied to magmatic Ni–Cu–EGP sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 76, 296-316.

BARNES, S. J., FIORENTINI, M. L., GODEL, B., LE VAILLANT, M., & LESHER, C. M. 2017. Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-EGP sulfide ore deposits: Disseminated and net-textured ores. *Ore Geology Reviews*, 81, 1035-1052.

BARNES, S. J., OSBORNE, G. A., COOK, D., BARNES, L., MAIER, W. D., & GODEL, B. 2011. The Santa Rita nickel sulfide deposit in the Fazenda Mirabela intrusion, Bahia, Brazil: Geology, sulfide geochemistry, and genesis. *Economic Geology*, 106(7), 1083-1110.

CAMPBELL, I. H., & S. J. BARNES 1984. "A model for the origin of the platinum-rich sulfide horizons in the Bushveld Complex." *Economic Geology* 79: 1950-1965.

CASTRO, F. F. D., GÓES, G. S., PEITER, C. C., GÓES, G. S., BRITTO, F. G. A. D., GREEN, M. H. P. D. L., & MATRIZ e MIRANDA, F. S. D. 2022. Transição energética e dependência por minerais críticos: aspectos geopolíticos, socioambientais e a perspectiva brasileira.

CUNHA J.C, BASTOS LEAL L.R, FRÓES R.J.B, TEIXEIRA W., MACAMBIRA M.J.B. 1996. Idade dos Greenstone Belts e dos Terrenos TTGs Associados do Cráton do São Francisco (Bahia, Brasil). In: SBG, Cong. Bras. Geol., 29., Salvador, Anais, 1:62-65.

CUNHA, J.C.; GARRIDO, I.V. DE A. E FRÓES, R.J.B. 1998. Projeto Verificações Minerais no Estado da Bahia - Prospecto Fazenda Mirabela. Salvador, CBPM. Unpublished.

DULFER, H., MILLIGAN, P. R., COGHLAN, R., CZARNOTA, K., HIGHET, L. M., CHAMPION, D. C., & SKIRROW, R. G. 2016. Potential for intrusion-hosted Ni-Cu-EGP sulfide deposits in Australia: a continental-scale analysis of mineral system prospectivity. *Geoscience Australia*.

EC – European Commission. Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU 2020– a foresight study. Luxemburgo: União Europeia.

FERREIRA FILHO, C. F., CUNHA, E. M., LIMA, A. C., CUNHA, J. C. 2013. Depósito de Níquel-Cobre Sulfetado de Santa Rita, Itagibá, Bahia, Brasil: Série Arquivos Abertos. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 39, 1-59.

FIGUEIREDO, D. (2005). Conceitos básicos de sensoriamento remoto. *São Paulo*.

FIORENTINI, M. L., BARLEY, M. E., BARNES, S. J., MAIER, W. D., & ROUXEL, O. J. 2017. Sulfide saturation controls on chalcophile and siderophile element ratios: An empirical assessment of the effects of sulfide composition and dissolved sulfur on magmatic sulfide–liquid partitioning. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 205, 1-24.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 2022. Malha Municipal. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhasterritoriais/15774-malhas.html>. Acesso em 04 de abril de 2024

IBRAM, 2012. Informações e Análise da Economia Mineral Brasileira. Brasília, 7ª Ed., 68 p.

IBRAM, 2019. Mirabela Mineração passa a se chamar Atlantic Nickel. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/mirabela-mineracao-passa-se-chamar-atlantic-nickel/> Acesso em 23/04/24.

IRTC, 2020– International Round Table on Materials Criticality. Material Criticality: an overview for decision makers. Brussels: IRTC.

KAUFMAN, Y. J., & FRIEDLANDER, S. 1994. Atmospheric correction for remote sensing: A review. *Remote Sensing of Environment*, 47(2), 193-205.

KHANNA, R., SA, I., NIETO, J., & SIEGWART, R. 2017. On field radiometric calibration for multispectral cameras. In 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 6503-6509). IEEE.

KEAYS, R. R. 1995. "Genesis of sulfide Ni-Cu-EGP deposits: an overview." In *Mineral Deposits*

LAZARIN, F. D. A. 2011. Geologia, petrologia e estudos isotópicos dos depósitos de níquel-cobre sulfetados Santa Rita e Peri-Peri, Nordeste do Brasil.

LE VAILLANT, M., BARNES, S. J., & FIORENTINI, M. L. 2016. Hydrothermal remobilisation around a deformed and remobilised komatiite-hosted Ni-Cu-(EGP) deposit, Sarah's Find, Agnew Wiluna greenstone belt, Yilgarn Craton, Western Australia. *Ore Geology Reviews*, 72, 624-643.

LE VAILLANT, M., FIORENTINI, M. L., BARNES, S. J., & MICKLETHWAITE, S. 2018. Review of Predictive and Detective Exploration Tools for Magmatic Ni-Cu-(EGP) Deposits, With a Focus on Komatiite-Related Systems in Western Australia. *Ore Geology Reviews*, 96, 239-268

LESHER, C. M., & R. R. KEAYS. 2002. "Komatiite-associated Ni-Cu-EGP deposits: geology, mineralogy, geochemistry, and genesis." In *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements*. Edited by L. J. Cabri. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, QC, Canada. Pp. 579-617.

LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., & CHIPMAN, J. W. 2015. *Remote sensing and image interpretation*. New York: Wiley.

MARINHO M.M. 1991. *La Séquence Volcano-Sédimentaire de Contendas Mirante et la Bordure Occidentale du Bloc Jequié (Cráton du São Francisco-Brésil): Un exemple de Transition Archéen Protérozoïque*. Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, França, Tese de Doutorado, 388p.

MARINHO M.M., VIDAL P.H., ALIBERT C., BARBOSA J.S.F., SABATÉ P. 1994. Geochronology of the Jequié-Itabuna granulitic belt and the Contendas Mirante volcano-sedimentary belt. In: M.C.H. Figueirêdo, A J. Pedreira. (eds.), *Petrological and Geochronologic evolution of the oldest segments of the São Francisco Craton, Brazil*. Bol. IG-USP., 17:73-96.

MARINI, O. J. 2016. *Potencial mineral do Brasil*. MELFI, AJ et al. Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 18-31.

MARTIN H., SABATÉ P., PEUCAT J.J., CUNHA J.C. 1991. Un segment de croûte continentale d'âge Archéen ancien (~3.4 milliards d'années): le Massif de Sete Voltas (Bahia-Brésil). C R. Acad Sci Paris. 313 (Serie II): 531-538.

MATHER, P. M. 2016. *Introdução ao Processamento de Imagens Digitais com Aplicações em Sensoriamento Remoto*. 4ª ed. São Paulo: Oficina de Textos.

MELLO E.F., XAVIER R.P., MCNAUGHTON N.J., FLETCHER I., HAGEMANN S., LACERDA C.M.M., OLIVEIRA E.P. 2000. Age constraints of felsic intrusions, metamorphism, deformation and gold mineralization in the paleoproterozoic Rio Itapicuru greenstone belt, NE Bahia State, Brazil. In: *International Geological Congress, 31., Abstract Volume, Special Symposium 18.4 - Stable and radiogenic isotopes in metallogenesis*.

MENEZES, P. D. T. L., Roig, H. L., SILVA, G. B., & MANE, M. A. 2006. *Prospecção mineral no Grupo Paranoá: reprocessamento de dados aerogamaespectrométricos e interpretação integrada a imagens TM-Landsat 5*. Revista Brasileira de Geofísica, 24, 343-355.

MESSIAS, C. G., & AYER, J. E. B. (2017). Classificação de imagens digitais LANDSAT 8 no software ENVI: material teórico-prático. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*, 1, 7372-7417.

NALDRETT, A. J. 2004. "Magmatic Ni-Cu-EGP deposits." In *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, Districts and Provinces*. Edited by W. G. Loveridge. Geological Association of Canada, Toronto, ON, Canada. Pp. 231-285.

NETO, R. A., 2009. Mirabela uma vitória da garra baiana. CBPM <<http://www.cbpm.ba.gov.br/mirabela-uma-vitoria-da-garra-baiana/>> Acesso em 23/04/24.

NOVO, E. M. L. M. 2010. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Blucher.

RICHARDS, J. A. 2013. Sensoriamento remoto: princípios e interpretação. 5ª ed. São Paulo: Oficina de Textos.

RIOS D.C. 2002. Granitogenese no Núcleo Serrinha, Bahia, Brasil: Geocronologia e Litogeoquímica. Inst. de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia, Tese de Doutorado, 233p.

SANTOS, M.M.; CUBA, E.A.; GOMES-de-SÁ, C.M. 1986. Jazida de níquel, cobre e cobalto de Americano do Brasil, Goiás. In: Principais Depósitos Minerais Brasileiros - Ferro e Metais da Indústria do Aço. Brasília, DNPM, v. 2, p. 258-273.

SILVA M.G. da., MARTIN, H., ABRAM, M.B., 1996. Datação do corpo máfico-ultramáfico da fazenda Mirabela (Ipiaú–Ba) pelo método Sm–Nd: Implicações petrogenéticas e geotectônicas. In: Congr. ^ Bras. Geol. 39, Salvador, Abstr., pp. 217–220.

SILVA L.C. da, MCNAUGHTON N.J., MELO R.C., FLETCHER I.R. 1997. U-Pb SHRIMP ages in the Itabuna-Caraíba TTG high-grade Complex: the first window beyond the Paleoproterozoic overprint of the eastern Jequié Craton, NE Brazil. In: SBG, I Intern. Symp. Granites and Associated Mineralisations, Salvador, Abstracts, 1: 282-283.

TEIXEIRA L.R. 1997. O Complexo Caraíba e a Suite São José do Jacuípe no Cinturão Salvador-Curaçá (Bahia-Brasil): Petrologia, Geoquímica e Potencial Metalogenético. Universidade Federal da Bahia, Bahia, Tese de Doutorado, 201p.

WEATHER SPARK. CLIMA E CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS MÉDIAS EM ITAGIBÁ NO ANO TODO. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30971/Clima-característico-em-Itagibá-Brasil-durante-o-ano> Acesso em: 07/04/2024

WELTER, A., STATELLA, T. de LIMA, G. M. 2020. Distorções causadas pela falta de calibração radiométrica e efeitos atmosféricos na análise de dados de sensoriamento remoto orbital. *Geografia*, 45(2), 361-383.

YANG, J., WEISBERG, P. J., & BRISTOW, N. A. 2012. Landsat remote sensing approaches for monitoring long-term tree cover dynamics in semi-arid woodlands: Comparison of vegetation indices and spectral mixture analysis. *Remote sensing of environment*, 119, 62-71.