



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

MARIA DAS GRAÇAS ALVES CARVALHO

**USO DO NDVI PARA ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS ÁREAS IMPACTADAS
PELA LAVRA DE BAUXITA NA REGIÃO NORTE DO BRASIL ENTRE OS ANOS DE
2018 A 2021**

CRATEÚS

2023

MARIA DAS GRAÇAS ALVES CARVALHO

USO DO NDVI PARA ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS ÁREAS IMPACTADAS PELA
LAVRA DE BAUXITA NA REGIÃO NORTE DO BRASIL ENTRE OS ANOS DE 2018 A
2021

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
do Campus Crateús da Universidade Federal
do Ceará, como requisito à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me Rafael Chagas Silva

CRATEÚS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C325u Carvalho, Maria das das Graças Alves.

Uso do NDVI para análise multitemporal das áreas impactadas pela lavra de Bauxita na região norte do Brasil entre os anos de 2018 a 2021 / Maria das das Graças Alves Carvalho. – 2023.
64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2023.

Orientação: Prof. Me. Rafael Chagas Silva.

1. Alumínio. 2. Pará. 3. Mineração. 4. Geoprocessamento. I. Título.

CDD 622

MARIA DAS GRAÇAS ALVES CARVALHO

USO DO NDVI PARA ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS ÁREAS IMPACTADAS PELA
LAVRA DE BAUXITA NA REGIÃO NORTE DO BRASIL ENTRE OS ANOS DE 2018 A
2021

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
do Campus Crateús da Universidade Federal
do Ceará, como requisito à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Rafael Chagas Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Agnaldo Francisco de Freitas Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Ivo e Rejane e todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para que isso fosse possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e coragem para realizar esse sonho, pela sua graça ter me sustentado por todo esse percurso de graduação, mesmo eu tendo enfrentado inúmeros momentos difíceis pelo percurso, a minha fé nele me fez resistir a tudo.

Aos meus pais Ivo e Rejane que sempre fizeram todo o possível para eu estudar, me apoiam em todos os meus passos, me encorajam a nunca desistir, e sempre me fizeram enxergar que eu sou capaz e que irei realizar todos os meus sonhos, sem eles nada disso seria possível, todas as vezes que pensei em desistir ou desanimar sempre lembrei que haviam 2 pessoas que estavam ali ao meu lado apostando tudo em mim. Ao meu irmão Igor que também foi fundamental para essa conquista. A minha madrinha/mãe Lídia, que sempre me cuidou e amou como filha. A toda minha família, aos que já partiram e aos que poderão vivenciar essa conquista ao meu lado.

As professoras Dra. Janaina e Dra. Luísa por terem confiado em mim por todos esses anos como bolsista, por sempre me apoiarem e me ajudarem quando precisei, vocês foram a ponte para descobrir o meu amor pela pesquisa científica. Ao amigo que a pesquisa científica me apresentou, Emerson Macedo, que me ajudou e muito contribuiu para a minha participação e permanência na pesquisa. Sou extremamente grata ao NIPI por ter sido onde aprendi e pude compartilhar o que sabia.

Ao Prof. Me. Rafael Chagas, pela excelente orientação, paciência e apoio durante todo esse percurso de escrita. Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões e a todos os professores que contribuíram com a minha graduação. Em especial os professores Diones e Emanuel que compõem a coordenação do Curso da Engenharia de Minas de Crateús.

A FAST2 Mine, não somente pela oportunidade de estágio, mas por ter sido um divisor de águas na minha vida profissional, onde pude aprender, compartilhar e sempre ser acolhida, a todos do time a minha eterna gratidão, em especial ao meu time de Marketing (Jerê, Jô, Lau e Carlim), muito obrigada por além de colegas de trabalho terem se tornados meus amigos. Minha eterna gratidão ao Jeremias por ter me confiado essa primeira oportunidade e por acreditar e tanto incentivar/apoiar a minha carreira profissional.

Por fim, a todos os meus amigos, em especial os que a graduação pode me ofertar, não irei citar nomes para não correr o risco de esquecer alguém, mas todos os que contribuíram com a sua amizade e afeto sintam-se por mim abraçados.

“Bem-aventurada aquela que acreditou, porque
vai acontecer o que o Senhor lhe prometeu.”

(Lucas 1:4)

RESUMO

A bauxita é uma rocha encontrada sobretudo em regiões tropicais e subtropicais do planeta, utilizada como matéria prima para se obter o alumínio. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais desse minério, sendo o estado do Pará a unidade da federação que mais contribuiu para este resultado. O método utilizado na lavra do minério de alumínio, normalmente, exige supressão de partes da vegetação nativa, o que torna necessário a realização de recuperação ambiental, que pode ser realizada seguindo o avanço das operações de mina. Em vista disto, o presente trabalho tem por objetivo analisar o desenvolvimento das áreas impactadas pela lavra de bauxita na região Norte do Brasil por meio de análise multitemporal de imagens de satélite com uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Para isto, a pesquisa foi dividida em quatro etapas, em que a primeira consistiu na seleção das principais empresas produtoras de bauxita do país. A etapa seguinte foi realizada por meio da aquisição e processamento dos dados georreferenciados. A terceira etapa baseou-se na interpretação das imagens com o uso do NDVI através das bandas 4, RED, e 8, NIR. E por fim, a quarta etapa caracterizou-se pela avaliação multitemporal das áreas produtoras de bauxita por meio da confecção de uma série temporal de mapas temáticos e da vetorização das imagens de classificação das áreas impactadas pela lavra de bauxita. A análise dos anuários de produção mineral permitiu selecionar as três principais empresas produtoras de bauxita do Brasil, que se situam no estado do Pará, sendo estas: Mineração Rio do Norte, Mineração Paragominas e Alcoa World Alumina, respectivamente. A aquisição e processamento dos dados georreferenciados permitiu localizar e analisar visualmente as áreas das empresas. A determinação do NDVI das áreas, possibilitou a identificação das áreas de superfícies não vegetais, solo exposto, baixa vegetação, vegetação moderada e vegetação alta para todos os anos por meio das classes de cobertura, através de cores que variaram do vermelho ao verde. Já a avaliação multitemporal das áreas produtoras de bauxita apresentou limitações, pois não houve janela atmosférica que permitisse a obtenção de imagens representativas de todas as áreas durante o interstício analisado. Entretanto, mesmo com limitações, o uso da técnica mostrou-se efetivo para a identificação de alguns pontos para as diferentes empresas analisadas, como: possíveis avanços verticais de lavra ao decorrer da série temporal, mudanças no layout da paisagem qualitativa do NDVI que aludiram a realização de recuperação ambiental, e aumento das áreas de solo exposto, que aludiram à expansão horizontal da lavra de bauxita.

Palavras-chave: Alumínio. Pará. Mineração. Geoprocessamento

ABSTRACT

Bauxite is a rock primarily found in tropical and subtropical regions of the planet, used as raw material to obtain aluminum. Brazil is one of the world's largest producers of this ore, with the state of Pará being the federal unit that contributes the most to this result. The method used in bauxite ore mining typically requires the removal of parts of the native vegetation, making environmental restoration necessary, which can be carried out in tandem with mining operations. In light of this, the present study aims to analyze the development of areas impacted by bauxite mining in the Northern region of Brazil through a multi-temporal analysis of satellite images using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). To achieve this, the research was divided into four stages. The first stage involved selecting the main bauxite-producing companies in the country. The next stage involved the acquisition and processing of georeferenced data. The third stage was based on the interpretation of images using NDVI with bands 4 (RED) and 8 (NIR). Finally, the fourth stage involved the multi-temporal assessment of bauxite-producing areas through the creation of a time series of thematic maps and vectorization of classification images of areas impacted by bauxite mining. Analysis of mineral production reports allowed for the selection of the three main bauxite-producing companies in Brazil, all located in the state of Pará: Mineração Rio do Norte, Mineração Paragominas, and Alcoa World Alumina, respectively. The acquisition and processing of georeferenced data enabled the identification and visual analysis of these companies' areas. Determining the NDVI of the areas made it possible to identify non-vegetated surfaces, exposed soil, low vegetation, moderate vegetation, and high vegetation for all years through coverage classes, represented by colors ranging from red to green. However, the multi-temporal assessment of bauxite-producing areas had limitations, as there was no atmospheric window that allowed the acquisition of representative images of all areas during the analyzed period. Nevertheless, despite these limitations, the technique proved effective in identifying certain points for the different companies analyzed, such as possible vertical advances in mining over the time series, changes in the qualitative landscape layout of the NDVI indicating environmental restoration efforts, and an increase in exposed soil areas suggesting the expansion of bauxite mining.

Keywords: Aluminum. Pará. Mining. Geoprocessing.

LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS

Figura 1 – Evolução da humanidade e sua relação com os recursos minerais.....	16
Figura 2 – Fases da mineração.....	17
Figura 3 – Operação de carregamento em uma mina de bauxita	20
Figura 4 – Preparação do solo para recuperação ambiental e avanço de lavra de bauxita	24
Figura 5 – Relação entre os conceitos de degradação, restauração, recuperação e reabili- tação	25
Figura 6 – Coleta de dados por sensoriamento remoto.....	27
Figura 7 – Espectro eletromagnético	28
Figura 8 – Variações de detalhamento para diferentes resoluções espaciais	30
Figura 9 – Imagens com diferentes níveis de quantização.....	31
Figura 10 – Configuração Orbital do satélite duplo Sentinel-2	32
Figura 11 – Variação da refletância da luz na vegetação	35
Figura 12 – Fluxograma metodológico da realização deste trabalho.....	36
Figura 13 – Localização dos processos de bauxita selecionados da empresa Mineração Rio do Norte	41
Figura 14 – Localização dos processos de bauxita selecionados da empresa Mineração Paragominas	42
Figura 15 – Localização dos processos de bauxita selecionados da empresa Alcoa Word Alumina	43
Figura 16 – Análise multitemporal da Mineração Rio do Norte entre os anos de 2018 a 2021	45
Figura 17 – Análise multitemporal da Mineração Paragominas entre os anos de 2018 a 2021	47
Figura 18 – Áreas em destaque para análise da Mineração Paragominas.....	48
Figura 19 – Análise multitemporal da Mineração Alcoa Word Alumina entre os anos de 2018 a 2021	50
Figura 20 – Áreas em destaque para análise da Alcoa Word Alumina.....	51
Gráfico 01 – Análise semi-quantitativa Mineração Rio do Norte.....	52
Gráfico 02 – Análise semi-quantitativa Mineração Paragominas.....	53
Gráfico 03 – Análise semi-quantitativa Alcoa Word Alumina	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características das imagens de satélite ESA Sentinel 2-A e 2-B.....	33
Quadro 2 – Classes de NDVI determinadas para a análise da área	37
Quadro 3 – Participação percentual das empresas na produção nacional de alumínio (bauxita) entre os anos de 2018 a 2021	39
Quadro 4 – Divisão das classes de NDVI por hectare da Mineração rio do Norte	61
Quadro 5 – Divisão das classes de NDVI por hectare da Mineração Paragominas	62
Quadro 6 – Divisão das classes de NDVI por hectare da Alcoa Word Alumina	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Agência Nacional da Mineração
ESA	Agência Espacial Europeia
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
GMES	<i>Global Monitoring for Environment and Security</i>
MRN	Mineração Rio do Norte
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NIR	Infravermelho Próximo
ONU	Organização das Nações Unidas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIGMINE	Sistema de Informações Geográficas da Mineração
SPOT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	Atividade Mineral.....	15
2.1.1	Histórico e Importância.....	15
2.1.2	Fases da Mineração.....	16
2.1.2.1	Pesquisa Mineral.....	17
2.1.2.2	Desenvolvimento de Mina.....	18
2.1.2.3	Planejamento de Lavra.....	19
2.1.2.4	Lavra - Produção de Mina.....	19
2.1.2.5	Beneficiamento Mineral.....	20
2.1.2.6	Fechamento de Mina.....	21
2.2	Impactos da atividade mineral.....	22
2.2.1	Impactos ambientais.....	22
2.2.1.1	Impactos no ar.....	22
2.2.1.2	Impactos na água.....	23
2.2.1.3	Impactos no solo.....	23
2.2.1.4	Impactos na biosfera.....	23
2.2.2	Degradação ambiental.....	24
2.2.3	Impactos positivos.....	26
2.3	Sensoriamento remoto.....	26
2.3.1	Princípios.....	27
2.3.2	Tipos de resolução dos sensores de imageamento.....	29
2.3.2.1	Resolução espectral.....	29
2.3.2.2	Resolução espacial.....	29
2.3.2.3	Resolução radiométrica.....	30
2.3.2.4	Resolução temporal.....	31

2.3.3	<i>Sentinel 2</i>	31
2.3.4	<i>Sensoriamento Remoto na mineração</i>	33
2.4	NDVI	34
2.4.1	<i>Princípio do NDVI</i>	34
2.4.2	<i>Aplicações</i>	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Seleção das empresas produtoras de Bauxita	36
3.2	Aquisição e Processamento dos dados georreferenciados	36
3.3	Interpretação das imagens com o uso do NDVI	37
3.4	Avaliação multitemporal das áreas produtoras de bauxita	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Seleção das empresas produtoras de bauxita	39
4.2	Processamento dos dados georreferenciados e determinação do NDVI .	44
4.2.1	<i>Mineração Rio do Norte (MRN)</i>	44
4.2.2	<i>Mineração Paragominas</i>	46
4.2.3	<i>Alcoa World Alumina</i>	49
4.3	Avaliação multitemporal semi-quantitativa das áreas produtoras	52
4.3.1	<i>Mineração Rio do Norte (MRN)</i>	52
4.3.2	<i>Mineração Paragominas</i>	53
4.3.3	<i>Alcoa World Alumina</i>	54
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICE A	61

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades mais rentáveis e estratégicas, pois é dela que provém matérias primas para boa parte das indústrias e seus produtos, entretanto, ela também representa uma das ações mais antrópicas ao meio ambiente (BIZUTI, 2017). No Brasil desde o século XVI esta é uma das atividades socioeconômicas mais importantes e isso está condicionado ao fato do país possuir boa parte das reservas de minério do mundo.

O minério de alumínio é uma das principais substâncias metálicas produzidas em território brasileiro, segundo dados do anuário mineral brasileiro da Agência Nacional de Mineração, entre os anos de 2018 a 2021 foram produzidas em média 42.540.463 toneladas de minério bruto de alumínio, sendo o estado do Pará o maior detentor das produções nacionais. Sua obtenção na forma metálica inicia-se, na mineração da bauxita, que é a matéria-prima da cadeia produtiva da indústria de alumínio e a base para as atividades industriais de produção de alumina, alumínio primário e produtos semimanufaturados (PINTO, 2019).

A exploração do minério de alumínio e da bauxita é realizada a céu aberto, geralmente por meio da lavra em tiras (*open cast mining*), onde normalmente a área de mineração é coberta por vegetação típica do bioma em que está localizada, por uma camada de solo orgânico e por uma camada de material estéril (ABAL, 2017). Dessa forma, a lavra de bauxita no norte brasileiro caracteriza-se pela retirada de parte da floresta Amazônica, pela remoção de extensas camadas superficiais e sub-superficiais do solo, o que ocasiona uma grande quantidade de áreas degradadas (REIS, 2006). Fazendo com que a recuperação de áreas degradadas seja uma atividade essencial para a lavra de bauxita (ABAL, 2017).

Segundo Cardozo, Pimenta e Ribeiro (2016) poucos estudos empregam o sensoriamento remoto no monitoramento das atividades de mineração. Desta forma, o presente trabalho se justifica na importância do uso de ferramentas de sensoriamento remoto, na obtenção de informações relacionadas a mudança de comportamento espectral da vegetação em áreas de mineração de bauxita, onde são movimentadas boa parte da cobertura vegetal local, o uso do NDVI, é considerado devido a sua ampla utilização em pesquisas voltadas à dinâmica da cobertura vegetal, e por permitir a realização de análises qualitativa e semiquantitativa das áreas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o desenvolvimento das áreas impactadas pela lavra de bauxita na região Norte do Brasil por meio de análise multitemporal, com uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar as principais empresas produtoras de bauxita na região Norte do Brasil;
- Construir um banco de dados georreferenciados com imagens do satélite Sentinel 2 da área em estudo;
- Processar as imagens de satélite por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;
- Vetorizar as imagens para análise semi-quantitativa das áreas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

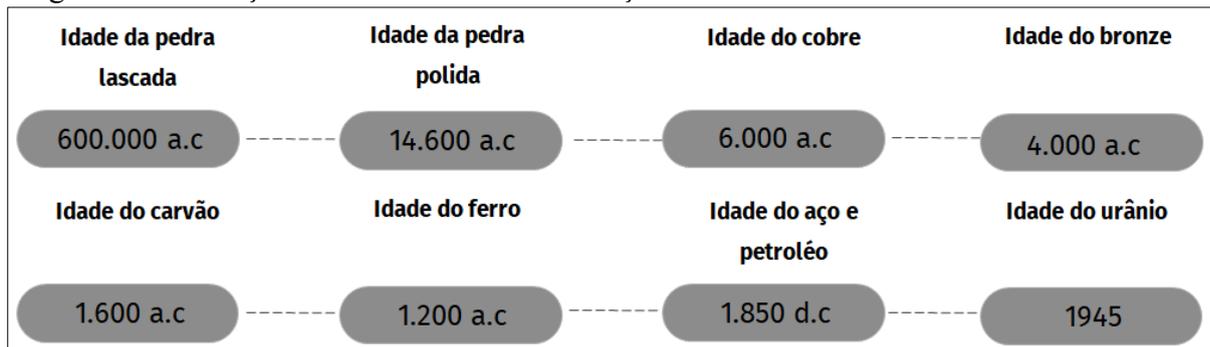
2.1 Atividade Mineral

A mineração consiste no processo de extração de minerais de valor econômico da crosta terrestre para benefício da humanidade (CASTRO; NALINI; LIMA; 2011). Segundo a classificação internacional adotada pela Organização das Nações Unidas (ONU), a mineração é definida como sendo a extração, elaboração e beneficiamento de minerais que se encontram em estado natural: sólido, como o carvão; líquido, como o petróleo bruto e gasoso, como o gás natural. Em outras palavras, trata-se especificamente de uma atividade do setor primário, que gera matéria-prima para o setor secundário, em virtude de seu caráter pioneiro, seu destaque não é apenas na indústria base, mas também impulsionando novas e outras oportunidades econômicas (CURI, 2017).

2.1.1 Histórico e Importância

A prática da atividade mineral é tão antiga quanto a própria civilização humana. Desde o surgimento do *Homo sapiens*, na pré-história, a mineração possui papel primordial na assistência ao homem na luta pela sobrevivência e consequente evolução. Desde a idade da pedra, a mineração tem favorecido o homem a fabricar ferramentas, produzir armas de caça, entre outros utensílios (CURI, 2017). De acordo com a Enciclopédia Barsa Universal (2010 *apud* 2017, Curi) a mineração vem exercendo uma função relevante para a humanidade, o que conotou representar sua evolução, também conhecida como Idade do Homem, por meio de marcos ou eras retratadas pelo domínio das técnicas de aproveitamento e diferentes usos das matérias-primas minerais, englobando desde questões ligadas a alimentação e a segurança até melhorias na qualidade de vida. Os períodos da idade do homem estão associados diretamente a evolução no tempo dos usos das rochas, minerais e metais, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Evolução da humanidade e sua relação com os recursos minerais



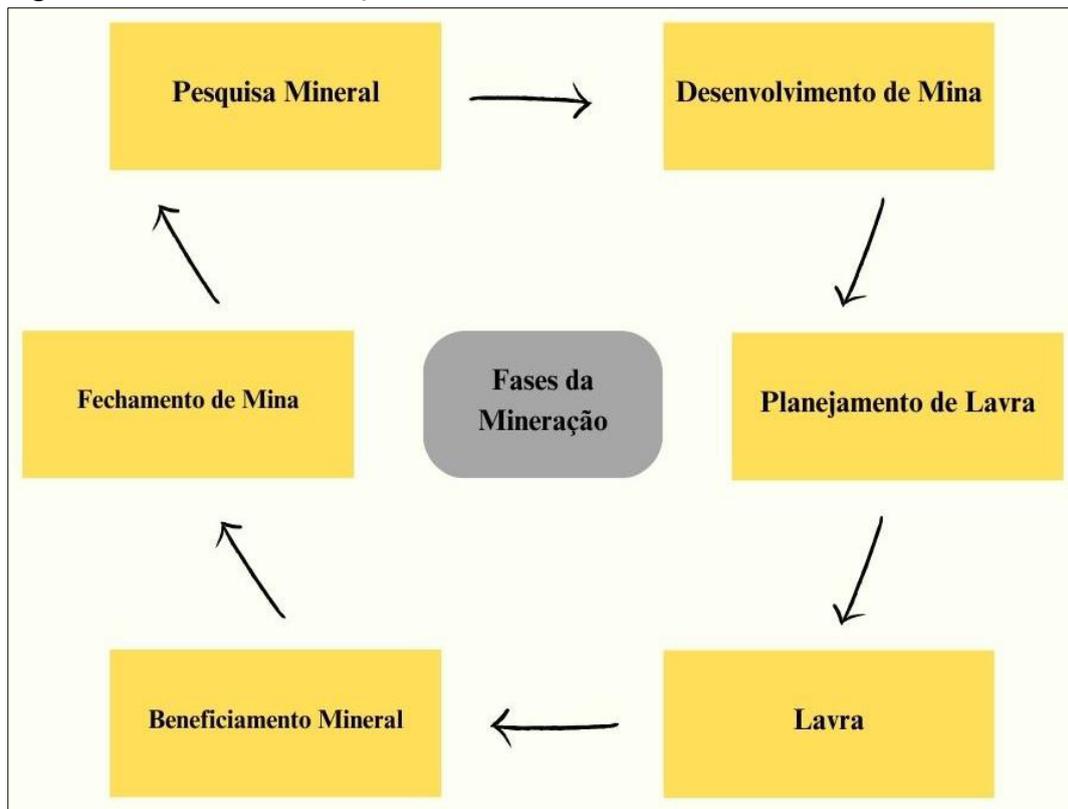
Fonte: Adaptado de CURI (2017)

O aumento da demanda por produtos industrializados, trouxe consigo a necessidade de uma maior quantidade de matéria-prima. É difícil imaginar o nível material alcançado por nossa civilização, sem o uso dos minerais (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2010). Qualquer atividade agrícola ou industrial, no campo da metalurgia, da indústria química, da construção civil ou do cultivo da terra, utiliza os minerais ou seus derivados. Os fertilizantes, os metais e suas ligas, o cimento, a cerâmica, o vidro, são todos produzidos a partir de matérias-primas minerais (LINS, 2008). Assim, atualmente a indústria da mineração é considerada uma das atividades de maior representatividade econômica de países como África do Sul, Austrália, Brasil, Canadá e Estados Unidos. No Brasil, a mineração está entre as atividades econômicas mais antigas e tradicionais (BOMFIM, 2017).

2.1.2 Fases da Mineração

A mineração, normalmente, é subdividida em fases interdependentes, que são: Pesquisa Mineral, Desenvolvimento de Mina, Planejamento de Lavra, Lavra (Produção Mineral), Beneficiamento Mineral e Fechamento de mina, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Fases da mineração



Fonte: Autora (2023)

2.1.2.1 Pesquisa Mineral

Esta etapa corresponde a realização dos trabalhos para a descoberta dos depósitos minerais, programação e execução dos serviços de quantificação e qualificação das reservas, nos depósitos encontrados. A sua correta execução compreende sequencialmente três sub etapas, que são: Exploração Geológica, Prospecção de Superfície e Avaliação de Depósitos (MARANHÃO, 1985). De acordo com Pereira (2003) durante a Exploração Geológica é realizado o reconhecimento de grandes áreas através de mapas geológicos, imagens de satélite, de radar, seguidos de levantamentos geológicos expedidos, com o objetivo de selecionar áreas que serão posteriormente alvos para trabalhos em detalhe. Após a identificação das anomalias é realizado a Prospecção Superficial que consiste em trabalhos sistemáticos, baseados nas relações custo/benefício como: mapeamento geológico semidetalhado, amostragem de afloramentos, prospecção geofísica, entre outras a fim de encontrar e caracterizar superficialmente um depósito mineral, e realizar trabalhos de pré-viabilidade técnico-econômica.

Por fim, a avaliação de depósitos é realizada a partir de testemunhos de sondagem, trabalhos mineiros e levantamentos geológicos/topográficos detalhados, é neste momento onde busca-se a geometrização do minério e conseqüentemente a quantificação do recurso mineral

por meio da quantificação dos teores, volumes, densidade e espessura do corpo mineralizado até uma certa profundidade, após isso pode-se obter informações sobre os custos de obtenção do material que será extraído e conclui-se sobre a viabilidade econômica da exploração. Finalizados os trabalhos, o depósito pode apresentar características econômicas que compensem a sua exploração e passa a ser considerado uma jazida mineral, ou apenas uma concentração anormal de um ou mais minerais, porém sem interesse econômico imediato, sendo dessa forma considerado uma ocorrência mineral. Estes conceitos de jazida e ocorrência não são estáveis no espaço e no tempo, pois ambos dependem de alguns fatores (MARANHÃO, 1985).

2.1.2.2 Desenvolvimento de Mina

Após obter-se sucesso na etapa de pesquisa mineral e ser comprovado a viabilidade do empreendimento, os trabalhos preparatórios para o aproveitamento da jazida mineral podem ser iniciados. Portanto, a etapa de desenvolvimento de mina corresponde a realização de projeto e construção das demais fases presentes em uma mina e sua realização segue o plano adotado durante o estudo de viabilidade, podendo este plano ser alterado à medida que se obtém novas informações sobre a jazida ou quando novas tecnologias de aproveitamento forem desenvolvidas. Dessa forma, durante o desenvolvimento de mina os acessos ao corpo de minério são criados, para permitir a entrada dos mineradores, de equipamentos, permitir a ventilação e também para a saída do material lavrado e dos resíduos gerados. Em uma mina a céu aberto boa parte desta etapa se concentra na realização de escavação das aberturas principais além de instalação e construção de outros equipamentos necessários para iniciar os trabalhos de lavra. Já para uma mina subterrânea, as aberturas de desenvolvimento são executadas para otimizar a operação da mina durante a lavra. Além disso, durante esta etapa é feita a seleção do método de lavra a ser usado, uma decisão importante, que considera inúmeros fatores para tal escolha (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002).

Segundo Curi (2017) o desenvolvimento de uma mina a céu aberto representa a realização das seguintes atividades: Decapeamento, construção das pilhas de estéril, oficinas escritórios, acessos, execução dos sistemas de drenagem, instalação das unidades de beneficiamento e a elaboração de depósitos provisórios de minério. Para uma mina subterrânea ocorrem as mesmas atividades, entretanto, com a necessidade de ser construídos acessos tanto principais que comunicam o interior da mina com a superfície quanto secundários, voltados a interligação do corpo de minério com as vias de acesso principais e com outras aberturas como chaminés e

subníveis.

2.1.2.3 *Planejamento de Lavra*

Antes do início da lavra, é imprescindível seguir um programa de produção preestabelecido para projetar as alterações da mina no espaço e no tempo futuro. Partindo deste ideal, o planejamento de lavra representa a elaboração do projeto de avanço da lavra de mina, ou seja, compreende a realização da previsão dos recursos e a definição dos custos relacionados. Por este motivo, compreende uma fase dinâmica, pois a medida que ocorre o avanço de lavra, novas informações vão sendo obtidas, portanto, o plano original sempre passará por modificações seguindo as novas condições que estão sendo evidenciadas na mina pela evolução natural da lavra. Em outras palavras, esta etapa mineira pode ser associada a um roteiro que descreve o arranjo da evolução operacional da mina, desde a sua implantação até o seu término. É importante destacar que cada plano de lavra é elaborado de acordo com a sua finalidade específica podendo ser a curto, médio e longo prazo, onde o plano de exaustão da mina segue o plano a longo prazo (CURI, 2014).

2.1.2.4 *Lavra - Produção de Mina*

Durante esta etapa são realizados sistematicamente as atividades essenciais ao aproveitamento econômico da jazida (CURI, 2017). Por este motivo, o principal foco desta etapa é a produção da mina, e para isso são empregadas operações unitárias extrativistas. A sequência destas operações é chamada de ciclo de operações, esta sequência é repetida várias vezes para produzir uma commodity mineral, tendo o ciclo mais comum as seguintes operações: perfuração, desmonte, carregamento e transporte, havendo modificações neste ciclo de acordo com o tipo de equipamento e tecnologia mais adequada ao processo de produção.

A escavação e o manuseio do material são as duas atividades essenciais para a execução dos trabalhos de lavra, em casos de lavra de minérios com alta dureza a escavação exige a realização de perfuração e desmonte (fragmentação da rocha), sendo estas operações unitárias de quebra de rocha. Já para rochas de baixa dureza a escavação pode ser realizada apenas com o emprego de dispositivos mecânicos. O manuseio dos materiais geralmente é executado através da atividade de carregamento, conforme apresentado na Figura 3. É importante destacar que os minérios podem ser explorados a seco ou via úmida por meio de métodos de lavra a céu aberto ou subterrâneos, onde a escolha do método definirá as operações que serão executadas e

podendo o método de lavra ser alterado com o decorrer das atividades mineiras (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002). A seleção do método está condicionada à configuração geométrica da jazida, assim, o método ideal será aquele que proporcione menores custos, maior segurança e menos poluentes, dessa forma, fatores econômicos e sociais são cruciais para esta decisão (CURI, 2017).

Figura 3 – Operação de carregamento em uma mina de bauxita



Fonte: Alcoa (2020)

2.1.2.5 *Beneficiamento Mineral*

A grande parte dos minérios, rochas e minerais encontrados na natureza necessitam antes do seu uso passar por melhorias nas suas propriedades físicas e/ou características químicas (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Além disso, em diversos casos as espécies minerais encontram-se misturadas, o que torna necessário a concentração da espécie útil, que é a separação do mineral de interesse dos demais em busca de obter um concentrado com máxima concentração econômica e condições para o seu aproveitamento industrial (CHAVES, 2012).

A concentração mineral explora as diferenças de propriedades físicas características e individualizadas entre o mineral-minério que é o mineral de aproveitamento econômico e os minerais de ganga, que não possuem viabilidade (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Para que isso seja possível é necessário um circuito de beneficiamento que consiste em uma sequência de operações unitárias, onde suas combinações e sequência variam para atender um determinado

objetivo ou as características específicas de um determinado minério. Estas operações podem ser esquematicamente agrupadas em: cominuição, concentração e operações auxiliares.

A sua melhor sequência de combinação é chamada de fluxograma e este é elaborado quando a organização das operações gera máxima recuperação do mineral útil. O processamento mineral requer muito conhecimento teórico, prático e sempre a realização de trabalhos experimentais em laboratório ou usina-piloto, isso devido ao fato de que cada minério é único e não é possível transferir resultados positivos obtidos em outros lugares para outra jazida (CHAVES, 2012).

2.1.2.6 *Fechamento de Mina*

O fechamento de mina é realizado após o término das produções, no momento em que há a finalização das atividades de desativação da mina. Ele pode ser executado de forma programada, quando o encerramento das atividades de produção mineral ocorrem segundo o estipulado no Plano de Fechamento, como também pode ocorrer de forma prematura caso este encerramento ocorra antes do tempo previsto no Plano de Fechamento, ou ainda pode ocorrer a suspensão temporária da produção que pode resultar na retomada da produção ou no fechamento prematuro (SÁNCHEZ; SILVA-SÁNCHEZ; NERI, 2013).

Segundo Sánchez (2001 *apud* 2016, Araújo) diversos fatores contribuem para que ocorra o fechamento de uma mina, alguns destes podem ser previstos como a exaustão das reservas minerais e a inviabilidade econômica da extração em função da quantidade de minério conhecida. Entretanto, existe outros fatores que não podem ser previstos como as flutuações de mercado, a incapacidade da mina em atender a demanda por minérios com determinadas especificações tecnológicas, a geração de impactos ambientais em grande escala, entre outros. A grande preocupação em torno do fechamento de mina se dá em decorrência da realização de um fechamento prematuro, pois quando as empresas não estão devidamente preparadas, pode ocorrer grandes problemas ambientais e sociais (ARAÚJO, 2016).

Dessa forma, é de extrema importância que as empresas pensem e planejem o fechamento da melhor forma possível, levando em consideração os efeitos sociais e ambientais gerados, buscando a melhor forma de recuperar as áreas degradadas tornando-as aptas a um novo uso produtivo. Por muitos anos a etapa de fechamento de mina foi negligenciada em vários países, inclusive no Brasil, o abandono das áreas mineradas sem o devido cuidado com os impactos negativos decorrentes, ocasionou um legado negativo, com significativos passivos

ambientais, com escavações e minas abandonadas sem contar com manutenção, monitoramento ou aplicação de técnicas e procedimentos de segurança nos seus componentes ao longo de sua vida útil (ARAÚJO, 2016).

2.2 Impactos da atividade mineral

A indústria extrativa mineral é uma atividade econômica importante e necessária para a sociedade. É ela que assegura o fornecimento de matérias primas fundamentais para a produção dos bens de consumo que garantem melhorias para o mundo moderno. Entretanto, a mineração é uma das atividades antrópicas que mais geram impactos socioeconômicos e ambientais. Desta forma, a atividade mineral possui poder de gerar impactos positivos e negativos (ARAÚJO, 2016).

2.2.1 Impactos ambientais

Segundo o artigo 1º da resolução Conama (1986) qualquer modificação das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, ocasionadas por uma forma de matéria ou energia provenientes das atividades humanas que, afetam direta ou indiretamente: a saúde, a segurança, o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota e a qualidade dos recursos ambientais é definida como impacto ambiental. Os impactos ambientais na atividade mineral são diversos, apresentando-se em várias escalas: desde problemas locais específicos até alterações biológicas, geomorfológicas, e atmosféricas em grandes proporções (DAMASCENO, 2017). Onde estes podem ser elencados em 4 categorias: Impactos no ar, impactos na água, impactos no solo e impactos na biosfera.

2.2.1.1 Impactos no ar

As operações de mina envolvem trabalhos com grandes quantidades de materiais que acabam comprometendo a qualidade do ar. As principais fontes de poluição são advindas da emissão de poeiras e gases. Isso porque grandes quantidades de partículas sólidas são facilmente dispersas durante a execução de escavações, desmontes, transporte de materiais, perfurações, peneiramento, e outras atividades (BOMFIM, 2017). Já em relação aos poluentes gasosos, seus principais contaminantes são o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO_2), os óxidos de enxofre (SO_x), os óxidos nítrico (NO_x) e hidrocarbonetos, onde suas emissões ocorrem

pelos diferentes processos e equipamentos que utilizam agentes químicos e motores a combustão, empregados na extração e transporte do minério (LIMA, 2009).

2.2.1.2 *Impactos na água*

A descarga no sistema de drenagem em superfície é a principal forma pela qual a atividade mineral afeta a qualidade da água. À vista disso, os principais impactos na água podem ser categorizados em: químico quando afeta o PH alterando a concentração de metais dissolvidos e compostos sintéticos; físico quando aumenta a concentração de sólidos em suspensão, causando turbidez e adsorção de metais; biológico quando ocorre migração e morte de espécies; ecológico quando gera alterações do habitat, bioacumulação de metais na cadeia alimentar e extinção de espécies. Além disso, os rejeitos de mina representam um risco de escoamento ácido, contribuindo para drenagem ácida e subsequente contaminação da água (BOMFIM, 2017).

2.2.1.3 *Impactos no solo*

A mineração envolve extração de materiais e minérios na superfície terrestre, sendo considerada a atividade que mais degrada a qualidade do solo. As rotinas das atividades de mineração modificam a paisagem, expondo os solos a erosão além da lixiviação de contaminantes afetar a superfície e a subsuperfície. A mineração superficial, por exemplo, é a que mais degrada o solo, devido supressão da vegetação e abertura de cavas e construção de vias de acesso (BOMFIM, 2017). Praticamente, toda atividade de mineração implica supressão de vegetação ou impedimento de sua regeneração.

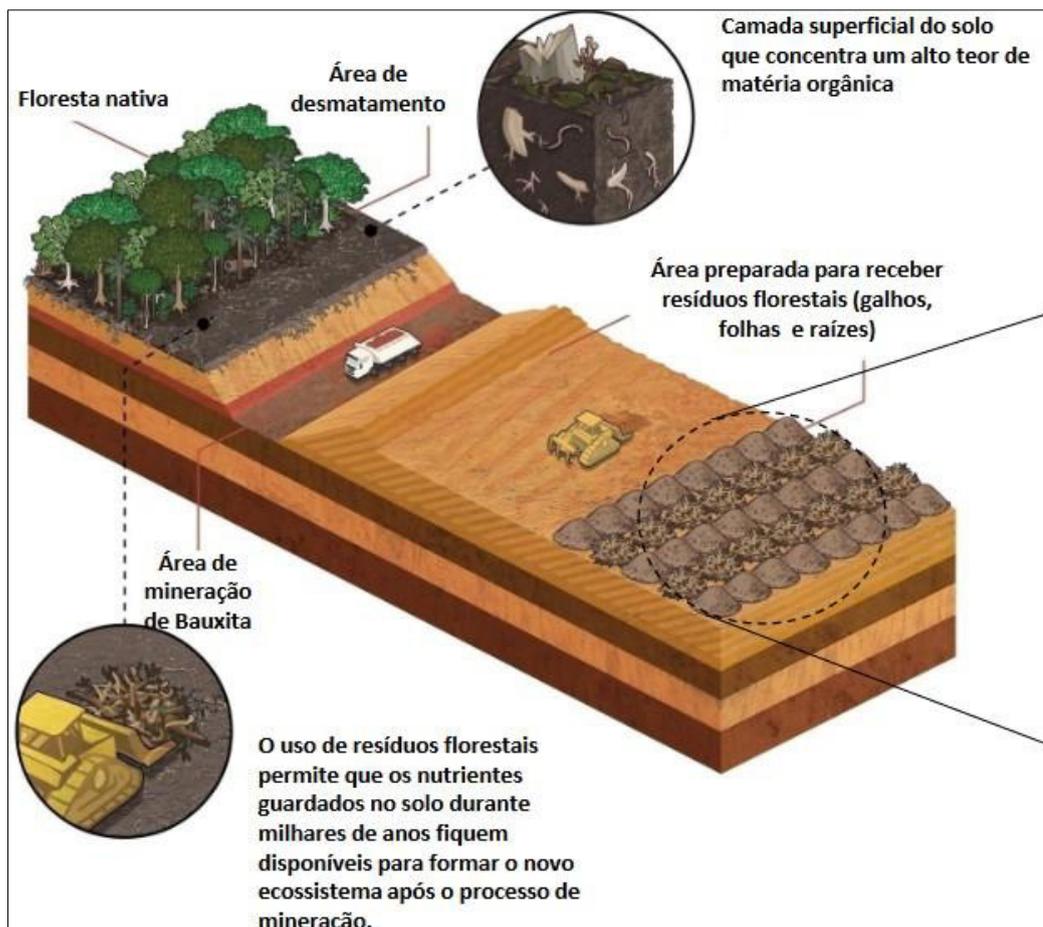
Em muitas situações, o solo superficial de maior fertilidade é também removido, e os solos remanescentes ficam expostos aos processos erosivos que podem acarretar em assoreamento dos corpos d'água do entorno (MECHI; SANCHES, 2010). Os impactos podem ocorrer devido a contaminação por poeira soprada através do vento e por derrames químicos e de resíduos. Havendo agravantes caso a poeira seja constituída por metais pesados, dependendo do mineral envolvido o solo pode tornar-se improdutivo por longo prazo (BOMFIM, 2017).

2.2.1.4 *Impactos na biosfera*

A supressão vegetal realizada nas fases iniciais da exploração mineral contribui diretamente com a perda da biodiversidade. A remoção da vegetação impacta diretamente na

redução de alimentos e de abrigo para a vida selvagem. É importante que a vegetação da área seja cuidadosamente catalogada para que as espécies possam ser utilizadas na recuperação da área. A Figura 4, mostra a preparação do solo para recuperação ambiental em uma lavra de bauxita. Alguns dos impactos das atividades minerárias na biosfera são: Alterações na vegetação natural e suas espécies, impactos nas áreas de reprodução de espécies, perturbação na vida aquática e efeitos sobre aves migratórias, mamíferos e peixes (BOMFIM, 2017).

Figura 4 – Preparação do solo para recuperação ambiental e avanço de lavra de bauxita



Fonte: Adaptado de Edisciplinas USP (2020)

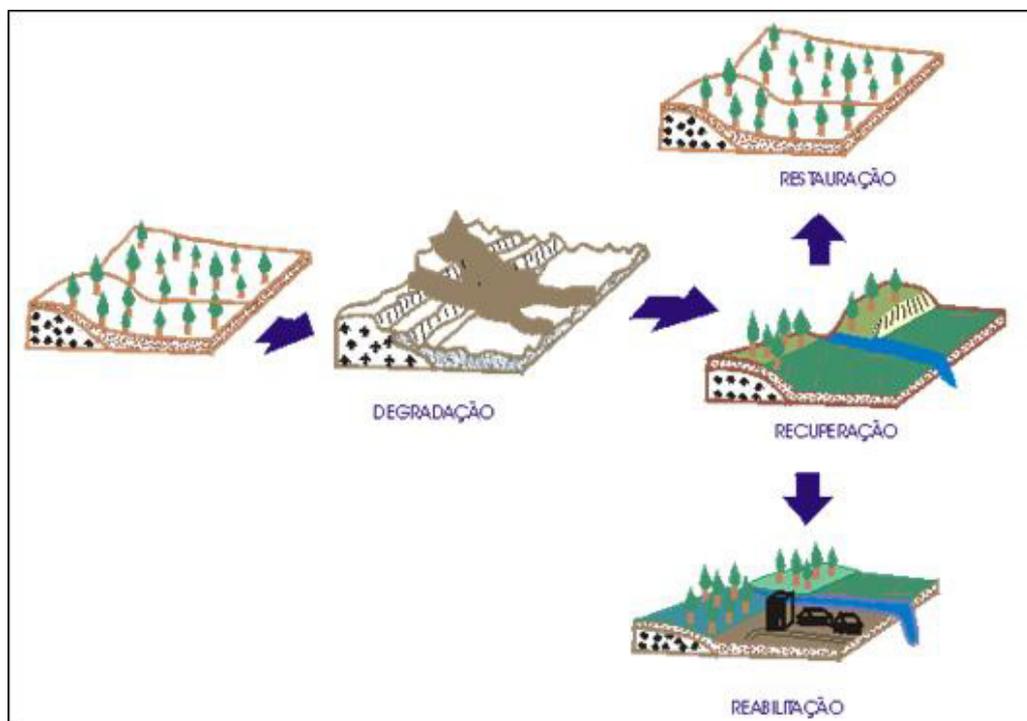
2.2.2 Degradação ambiental

Atividades antrópicas como a mineração ocasionam diferentes níveis de degradação ambiental, em alguns casos ocorrendo apenas uma perda temporária da capacidade regenerativa dos ecossistemas florestais, mas na grande maioria se tratando de uma completa remoção dos horizontes férteis do solo e a geração de substratos de difícil colonização. Por este motivo, a

mineração pode ser considerada como uma das atividades mais impactantes ao solo, mesmo que em geral, não afete grandes extensões territoriais. Um exemplo destas degradações pode ser evidenciado na mineração de bauxita no norte brasileiro, que caracteriza-se pelo desmatamento da floresta amazônica, intensa movimentação das camadas superficiais e sub-superficiais do solo e a geração de rejeitos e outros substratos de difícil colonização para a vegetação (REIS, 2006).

Segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) a degradação do solo é definida como sendo a mudança de saúde do solo que resulta na redução da capacidade do ecossistema de fornecer bens e serviços para os seus beneficiários. Dessa forma, a degradação é um processo induzido pelo homem ou por acidente natural que diminui a capacidade produtiva atual e futura dos ecossistemas. Diante disso, a área impactada pelas atividades de mineração deve passar por recuperação que é a restituição de um ecossistema degradado a uma forma utilizável, segundo um plano preestabelecido para o uso do solo. Portanto, a recuperação ambiental é um termo utilizado de forma genérica para se referir as atividades de restauração (obtenção de ecossistema idêntico ao original) e reabilitação (criação de um ecossistema novo no lugar do antigo), conforme mostrado na Figura 5 (SANTOS, 2017).

Figura 5 – Relação entre os conceitos de degradação, restauração, recuperação e reabilitação



Fonte: Amarantes (1989) *apud* Santos (2017)

2.2.3 Impactos positivos

Pela visão dos benefícios advindos da atividade mineral, pode ser apontada não somente a característica de ser a atividade mineradora uma das principais atividades produtoras de matéria-prima para o bem-estar da população e funcionamento da economia global (MANCINI; SALA, 2018), mas também o fato do setor mineral gerar resultados positivos no campo econômico, dimensionados pela produção e comercialização dos bens minerais, pela oferta de empregos e pela geração de receitas para os cofres públicos por meio de impostos e *royalties* (CUNHA et al., 2019). Em termos sociais, um empreendimento mineiro leva progresso a região em que ocorre sua implantação, valorizando ao máximo o aproveitamento da mão de obra local, propiciando a elevação do padrão de vida dos habitantes da área de influência do projeto (CURI, 2014).

Além disso, a implantação de um empreendimento mineiro traz consigo uma reestruturação de infraestrutura econômica que acarreta benefícios coletivos, como o surgimento de novos núcleos urbanos e o desenvolvimento de outros setores produtivos. A infraestrutura construída para atender a demanda de um empreendimento mineiro contribui para a diversificação produtiva regional, entre estes podem se enquadrar a construção de serviços terciários como oficinas, montadoras, lojas de materiais, de peças, que servirão diretamente para atender as empresas mineradoras e contribuirão para o comércio local e geração de empregos (LEITE, 2013).

2.3 Sensoriamento remoto

Entende-se por sensoriamento remoto a ciência que permite a obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os alvos terrestres (MENESES; ALMEIDA, 2012). Em outras palavras, as imagens obtidas possibilitam ampliar a nossa visão espectral, espacial e temporal dos ambientes terrestres, proporcionando uma visão sinóptica (de conjunto) e multitemporal (em diferentes datas) de extensas áreas da superfície terrestre. Por meio delas, os ambientes mais distantes ou de difícil acesso tornam-se mais acessíveis (FLORENZANO, 2011).

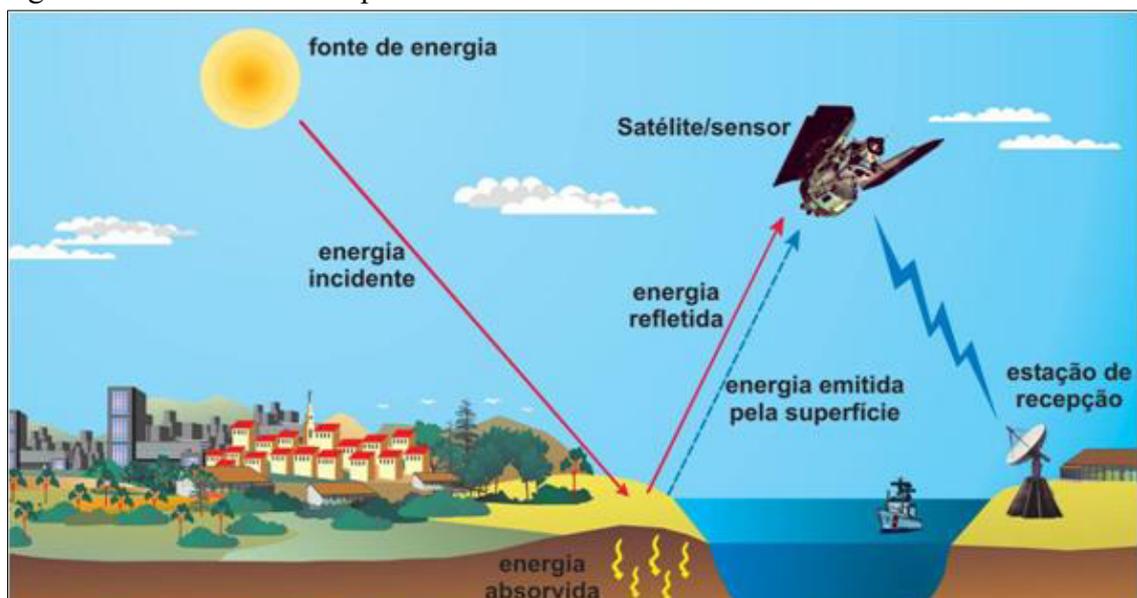
Os dados obtidos por sensoriamento remoto são de abrangência espacial muito superior àqueles advindos de levantamento de campo. Em regiões ou áreas de difícil acesso, ele permite a obtenção de dados espaciais de forma rápida, precisa e acessível, o que facilita

a comparação de regiões. O imageamento de grande altitude proporciona uma visão sinóptica que viabiliza a compreensão de alterações espaciais de larga escala. O imageamento repetitivo favorece o monitoramento de grandes áreas e a manutenção de arquivos de imagens possibilita a extração de dados do passado (MACHADO; QUINTANILHA, 2008).

2.3.1 Princípios

A principal fonte de energia utilizada no sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética, que se propaga em forma de ondas eletromagnéticas com a velocidade da luz no vácuo (FLORENZANO, 2011). Ela pode ser definida como uma forma dinâmica de energia que se manifesta a partir de sua interação com a matéria (NOVO, 2010). Portanto, para obtenção de dados por Sensoriamento Remoto faz-se necessário o uso de energia, que pode ser proveniente de uma fonte natural, como a luz do sol e o calor emitido pela superfície da Terra ou ainda por uma fonte artificial (FLORENZANO, 2011). A Figura 6 ilustra como é realizado a coleta de dados a nível orbital através de sensoriamento remoto a partir de um sensor imageador, parte da radiação solar incidente na superfície é refletida e captada pelo sensor, que transmite os dados para uma estação de recepção que irá processar os dados e obter como produto imagens com dados sobre a superfície.

Figura 6 – Coleta de dados por sensoriamento remoto



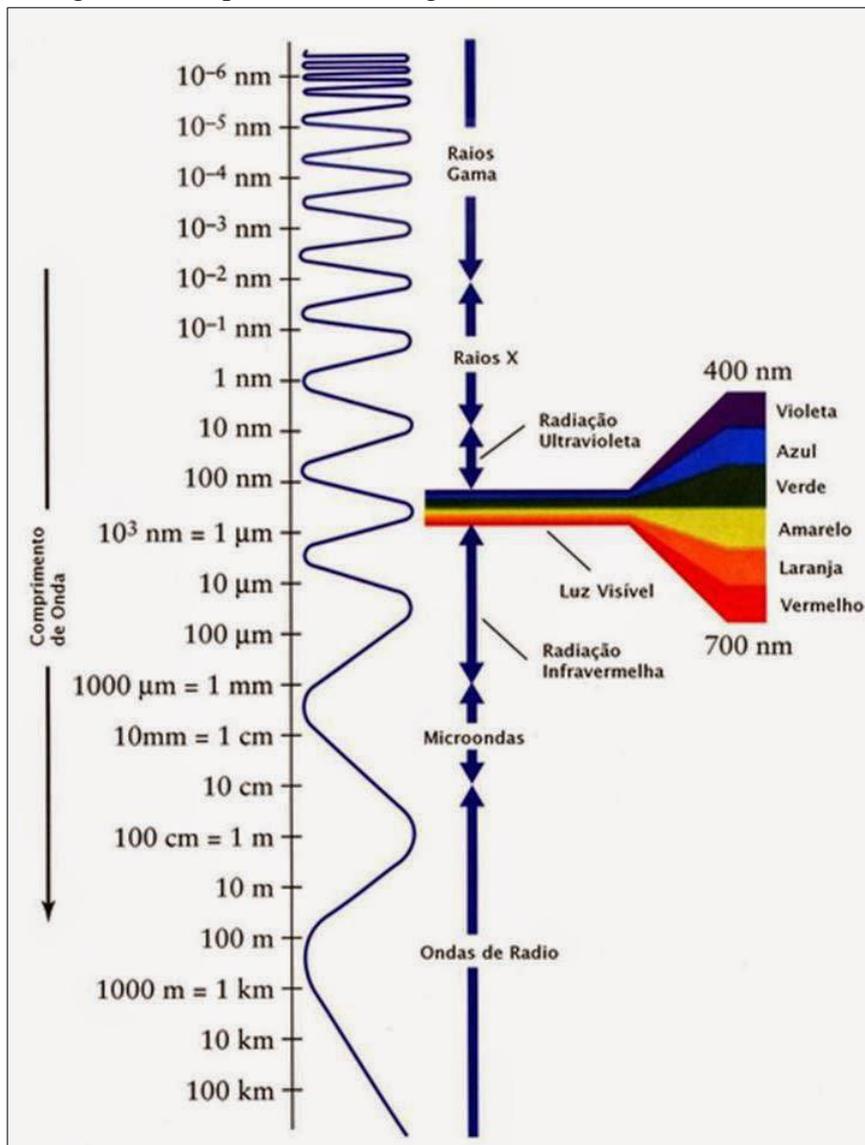
Fonte: Florenzano (2011)

Segundo Florenzano (2011) os alvos da superfície terrestre, como a vegetação, a água e o solo, refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que

variam com o comprimento de onda, de acordo com as suas características biofísicas e químicas e são graças a essas variações que é possível distinguir os objetos individualmente por meio de sensores remotos.

A radiação eletromagnética é qualificada por apresentar comprimentos de onda λ que representam a distância entre dois pontos de igual intensidade dos campos elétrico e magnéticos. A sua distribuição em relação ao seu comprimento de onda ou frequência é definida como sendo o seu espectro eletromagnético e este engloba a luz visível, os raios gama, as ondas de rádio, as microondas, os raios X, ultravioleta e infravermelho, como mostrado na Figura 7 (MACHADO; QUINTANILHA, 2008).

Figura 7 – Espectro eletromagnético



Fonte: Kaufmann III, W. J. (1991) *apud* Machado; Quintanilha (2008)

2.3.2 Tipos de resolução dos sensores de imageamento

As potencialidades de um sensor de imageamento podem ser identificadas por meio de suas resoluções (MENESES; ALMEIDA, 2012). Segundo Fitz (2008) as resoluções dependem de características específicas definidas pelas próprias imagens coletadas. Sendo assim, a detecção ou identificação de um objeto nas imagens de sensoriamento remoto não é determinada somente pela resolução espacial, mas por quatro diferentes formas de medições, que são: A área do campo de visada do sensor, o comprimento de onda das bandas, os valores numéricos da medida da radiância do alvo e pela data em que a imagem foi tomada e o período do imageamento. São essas quatro formas de medidas que são descritas em termos de resoluções denominadas de resolução espacial, radiométrica e temporal (MENESES; ALMEIDA, 2012).

2.3.2.1 Resolução espectral

A resolução espectral mede o comprimento das faixas espectrais e a sensibilidade do sensor em distinguir entre dois níveis a intensidade do sinal de retorno. Em outras palavras, corresponde ao número e ao intervalo das bandas espectrais medidas pelo sistema sensor. A posição no espectro eletromagnético, largura e número de bandas espectrais define o grau com que alvos individualizados (espécies vegetais, plantações, tipos de rochas, etc.) podem ser caracterizados em uma imagem multiespectral (MACHADO; QUINTANILHA, 2008).

Portanto, um sensor dispõe de maior resolução espectral se ele possuir maior número de bandas situadas em diferentes regiões espectrais e com larguras estreitas de comprimentos de onda. Isso ocorre devido as diferenças relativas de reflectância entre os materiais da superfície da terra, que permitem diferenciar um material do outro, em certos intervalos de comprimentos de onda (MENESES; ALMEIDA, 2012).

2.3.2.2 Resolução espacial

A resolução espacial é um importante parâmetro do sensor porque ela define o tamanho do menor objeto que pode ser identificado em uma imagem (MENESES; ALMEIDA, 2012). Sendo assim, ela pode ser traduzida como a área real abrangida no terreno por cada pixel correspondente na imagem (FITZ, 2008). De acordo com (MENESES; ALMEIDA, 2012) sua escolha é feita com base na utilização da imagem, a identificação de objetos em uma grande área,

não exige altas resoluções espaciais, entretanto para trabalhos que precisam de alto detalhamento, consequentemente é necessária resolução maior. As Imagens na Figura 8 da esquerda para a direita representam respectivamente imagens dos satélites, Landsat com resolução espacial de 30m, Spot com 10 m e Ikonos com 1m, de uma porção do Lago Paranoá de Brasília, onde nestas imagens é possível identificar variações de detalhamento nos tamanhos dos alvos em uma mesma área de imageamento para diferentes resoluções espaciais.

Figura 8 – Variações de detalhamento para diferentes resoluções espaciais

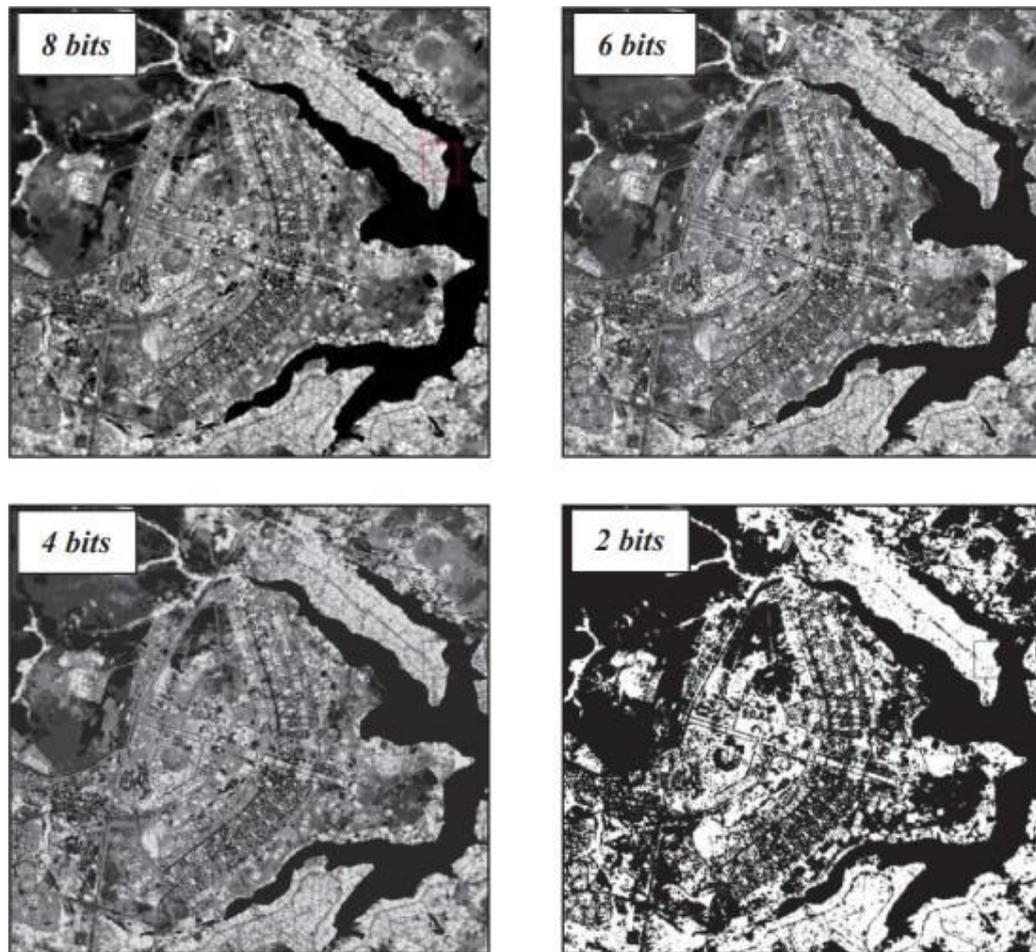


Fonte: Meneses; Almeida (2012)

2.3.2.3 Resolução radiométrica

Refere-se à capacidade do sensor de discriminar a intensidade de energia refletida ou emitida pelos objetos (FLORENZANO, 2011). Por este motivo, está relacionada com a quantidade de níveis digitais presentes em uma imagem, vinculando-se com a qualidade desejada da imagem, maiores níveis digitais representam maior resolução radiométrica (FITZ, 2008). À medida da resolução radiométrica é chamada de quantização. Em termos práticos, a quantização do sinal é medida pelo intervalo de número de valores digitais usados para expressar os valores de radiância medidos pelo detector. A quantização é normalmente expressa em dígitos binários (bits) (MENESES; ALMEIDA, 2012). Quanto maior é a quantização, maior será a qualidade visual da imagem, como é possível analisar nas imagens da Figura 9, pois observa-se que a imagem de 8 bits ($2^8 = 256$) possui detalhes visuais melhores que as imagens de menores resoluções radiométricas de 6, 4 e 2 bits, tendo a imagem de 2 bits apenas 4 níveis de cinza.

Figura 9 – Imagens com diferentes níveis de quantização



Fonte: Meneses; Almeida (2012)

2.3.2.4 Resolução temporal

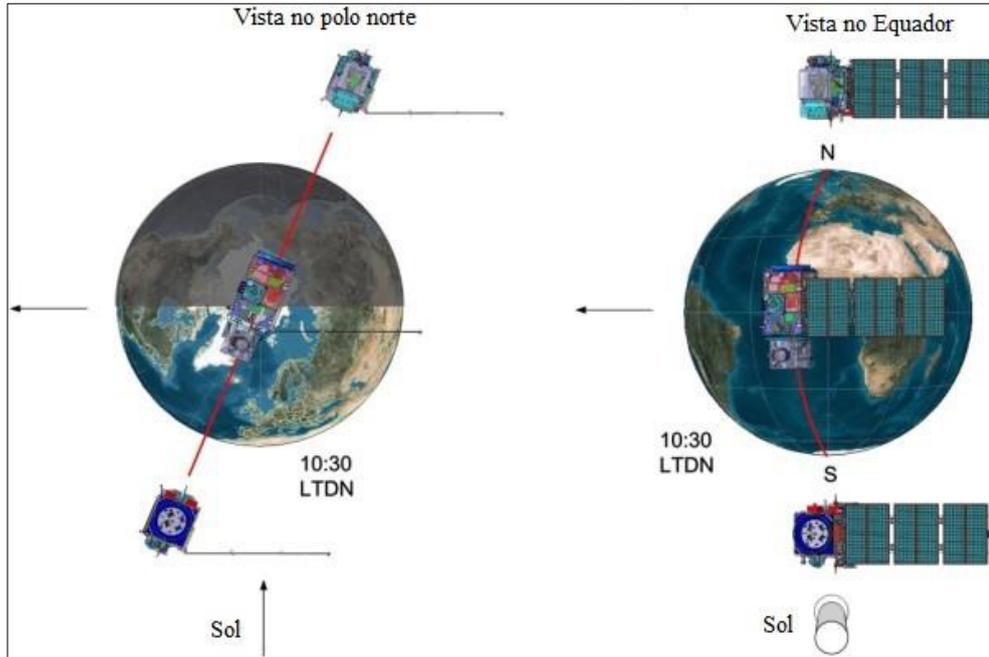
Esta resolução é fundamental para acompanhar ou detectar a evolução ou mudanças que ocorrem na Terra, principalmente para alvos mais dinâmicos, como o ciclo fenológico de culturas, desmatamentos, desastres ambientais, e monitoração ambiental (MENESES; ALMEIDA, 2012). Pois refere-se à frequência que o sensor revisita uma área e obtém imagens periódicas ao longo de sua vida útil (MENESES; ALMEIDA, 2012). Ou seja, é a frequência de imageamento sobre uma mesma área (FLORENZANO, 2011).

2.3.3 Sentinel 2

O satélite europeu Sentinel 2 pertence a missão imageadora multispectral do Programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) administrado pela Agência Espacial Europeia (ESA). Ele está disponível desde junho de 2015 e através de um sensor óptico

com alta resolução espacial seu uso é direcionado ao monitoramento da vegetação, solos e áreas costeiras (EMBRAPA, 2020). Sua configuração orbital é mostrada na Figura 10, onde é possível constatar que ele é composto por uma constelação de dois satélites em órbita polar colocados na mesma órbita síncrona do sol, em fases a 180° entre si, carregando consigo Instrumentos de Imagens Multiespectrais (ESA) (THE EUROPEAN SPACE AGENCY, 2022).

Figura 10 – Configuração Orbital do satélite duplo Sentinel-2



Fonte: Adaptado de *The European Space Agency* (2022)

Um dos seus objetivos é complementar outras missões de satélite, como os programas de satélite Landsat e Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT), garantindo a continuidade no monitoramento da dinâmica na superfície da Terra (THE EUROPEAN SPACE AGENCY, 2022). E isso só é possível devido a sua resolução espacial de 10 m que permite aos dados do Sentinel, o potencial para exploração detalhada da superfície da Terra, além de sua alta resolução temporal de 5 dias, que favorecem o monitoramento eficaz de mudanças que ocorrem dentro de um curto período. A largura de sua faixa orbital é de 290 km e sua capacidade permite gravar 13 bandas espectrais com resoluções espaciais que variam de 10 a 60 m, sendo quatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m e três bandas a 60 m de resolução espacial. O Quadro 1 mostra que as bandas do espectro visível e do Infravermelho Próximo (NIR) possuem resolução espacial de 10 m, as bandas de infravermelho possuem resolução espacial de 20 m e as demais bandas apresentam 60 m de resolução espacial. (PHIRI *et al.*, 2020).

Quadro 1 – Características das imagens de satélite ESA Sentinel 2-A e 2-B

		Sentinel 2-A		Sentinel 2-B	
Resolução espacial (m)	Bandas	Comprimento de onda (nm)	Largura de onda (nm)	Comprimento de onda (nm)	Largura de onda (nm)
10	Banda 2- Azul	492,40	66	492,10	66
	Banda 3- Verde	559,80	36	559,00	36
	Banda 4- Vermelho	664,60	31	664,90	31
	Banda 8- NIR	838,80	106	832,90	106
20	Banda 6- Borda vermelha	740,50	15	739,10	15
	Banda 7- Borda vermelha	782,80	20	779,70	20
	Banda 8A- NIR estreito	864,70	21	864,00	22
	Banda 11- SWIR	1613,70	91	1610,40	94
	Banda 12- SWIR	2202,40	175	2185,70	185
60	Banda 01- Aerossol costeiro	442,70	21	442,20	21
	Banda 09- Vapor de água	945,10	20	943,20	21
	Banda 10- SWIR-Cirrus	1375,50	31	1376,90	30

Fonte: Adaptado de *Phiri et al.* (2020)

2.3.4 Sensoriamento Remoto na mineração

Segundo Cardozo, Pimenta e Ribeiro (2016) poucos estudos empregam o sensoriamento remoto no monitoramento das atividades de mineração. Entretanto, esta tecnologia possui um papel cada vez maior na gestão de áreas de mineração. Juntamente com o Sistema de Informações Geográficas, eles fornecem informações e dados estatísticos para avaliação da diversidade de habitat e a mudança da cobertura da terra enquanto a mina está em operação, estes dados podem ser usados para formular políticas e diretrizes de gestão da área pós-mineração, no planejamento de fechamento de mina, recuperação ambiental, monitoramento, caracterização da paisagem e alternativa socioeconômica para reinserção da área no sistema produtivo.

De acordo com Silva (2020) os SIG's e o sensoriamento remoto possuem uma função de destaque nos empreendimentos minerários, pois quando empregados concomitantemente, apresentam dados que possibilitam uma avaliação prévia à operação de um empreendimento mineiro. Além disso, o sensoriamento remoto permite realizar análises eficientes para o processamento de dados georreferenciados, o que o torna uma ferramenta imprescindível no entendimento de diver-

mentos e suas interações. Constituindo como aliadas no planejamento, monitoramento e fiscalização ambiental, com o intuito de proteger o meio ambiente.

2.4 NDVI

De acordo com Casari (2016), durante a interação entre a vegetação e a radiação solar a maior absorção no espectro de refletância ocorre tipicamente nos comprimentos de onda vermelho e azul, refletindo fortemente no infravermelho (NIR). Portanto, alterações no teor de água, pigmentos, teor de carbono e outras propriedades podem causar variações em todo o espectro, fornecendo assim, informações significativas sobre a saúde da planta, e outras características importantes. Em virtude disto, surgem os índices de vegetação, e entre estes destaca-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) devido sua frequente utilização no processamento de imagens de sensoriamento remoto (MENESES; ALMEIDA, 2012). Este índice envolve a diferença e a soma entre as duas bandas do infravermelho próximo e do vermelho, como mostrado na Equação 2.1.

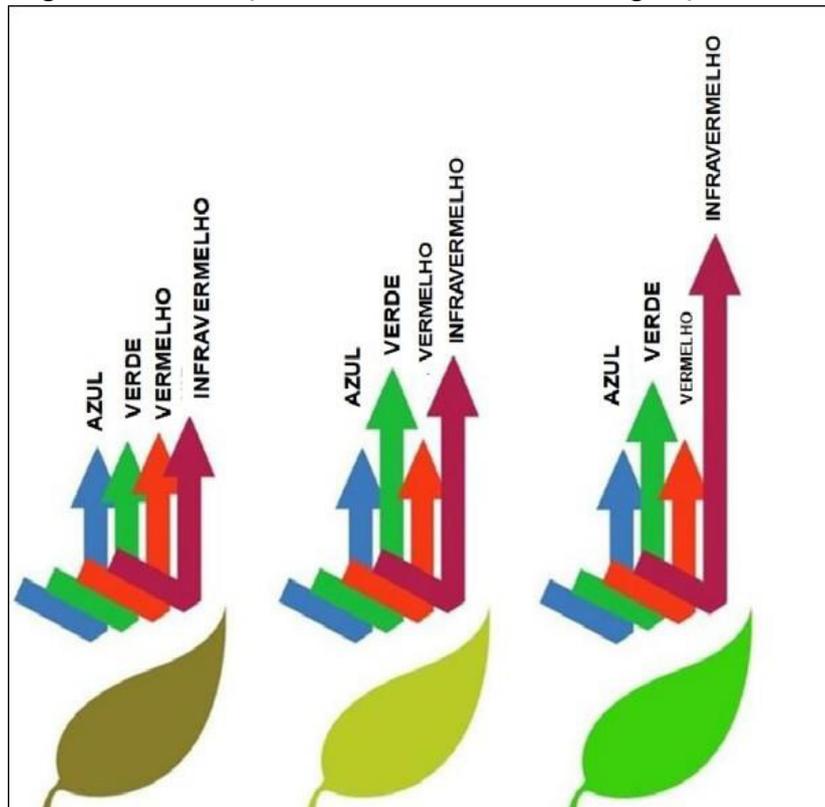
$$NDVI = \frac{NIR - Vermelho}{NIR + Vermelho} \quad (2.1)$$

Sua faixa de valores varia entre -1 e 1, onde 1 indica a presença de muita vegetação e -1 a ausência de vegetação e a vegetação saudável geralmente apresenta valores de 0,20 a 0,80 (CASARI, 2016). A utilização do NDVI permite observar a variação da cobertura vegetal em uma área de interesse e isso é realizado por meio da confecção de uma série temporal de mapas, cuja interpretação viabilizam a avaliação das variações de vegetação, permitindo inferir informações relacionadas a degradação ambiental local (MENESES; ALMEIDA, 2012).

2.4.1 Princípio do NDVI

O princípio básico do NDVI fundamenta-se no fato de folhas verdes refletirem muita luz no infravermelho próximo, em forte contraste com a maioria dos alvos não vegetais. Dessa forma, quando a planta se torna estressada ou desidratada, as folhas passam a refletir menos luz no infravermelho próximo, mas o mesmo montante de luz na faixa do visível é refletido. Assim, a combinação matemática desses sinais pode ajudar a diferenciar uma planta de outros objetos e uma planta saudável de uma planta estressada ou doente. E esta razão entre o infravermelho refletido e a radiação vermelha é usada como um indicador de estresse em plantas, como ilustrado na Figura 11 (CASARI, 2016).

Figura 11 – Variação da refletância da luz na vegetação



Fonte: Casari (2016)

Durante a fotossíntese, as plantas absorvem a luz nas bandas azul e vermelha e refletem a luz verde. Se a quantidade de cloroplastos diminuir, conseqüentemente a quantidade de radiação vermelha absorvida também irá diminuir. A tonalidade marrom é adquirida pelas plantas quando morrem, indicando assim o aumento da reflexão radiação vermelha (MOREIRA, 2001).

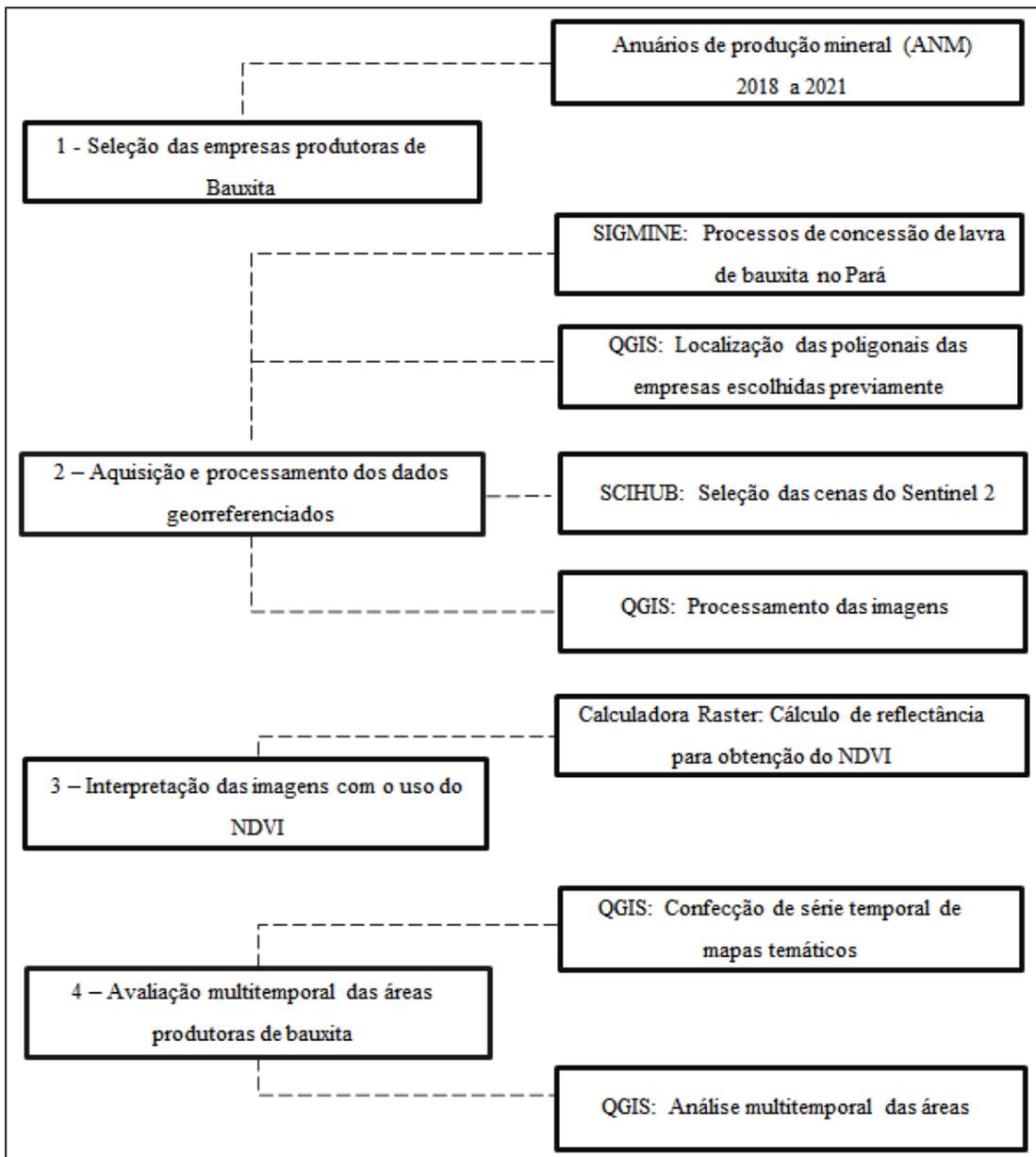
2.4.2 Aplicações

Segundo Liu (2007) os índices de vegetação são utilizados para condensar as informações espectrais e diferenciar o que é vegetação do que não é vegetação, avaliar as condições de crescimento das culturas, ocorrências de doenças, pragas, secas e diversos outros eventos catastróficos ou meteorológicos. O NDVI é empregado com êxito para identificar o arranjo global de vegetação, deduzir alterações ecológicas e ambientais, geração de biomassa, radiação fotossintética ativa e a produção de culturas, dessa forma, seu uso é viável como medida indireta de complexidade e heterogeneidade ambiental. Sua aplicação contribui para o estudo da ecologia e conservação da biodiversidade reduzindo tempo e custos na análise ambiental (GAMARRA et al., 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos idealizados para esta pesquisa consistiram na realização de quatro etapas, que foram: seleção das empresas produtoras de Bauxita; aquisição e processamento dos dados georreferenciados; interpretação das imagens com o uso do NDVI; e avaliação multitemporal das áreas produtoras de bauxita. A Figura 12 ilustra as etapas realizadas bem como a sequência de sua realização.

Figura 12 – Fluxograma metodológico da realização deste trabalho



Fonte: Autora (2023)

3.1 Seleção das empresas produtoras de Bauxita

A seleção das empresas produtoras de bauxita foi realizada por meio dos dados de produção mineral dos anos de 2018 a 2021 disponíveis nos anuários de produção mineral das principais substâncias metálicas, no site da Agência Nacional de Mineração (Anuário Mineral Brasileiro — Agência Nacional de Mineração (www.gov.br)), o critério para a seleção baseou-se na participação percentual da empresa na produção de alumínio do país.

3.2 Aquisição e Processamento dos dados georreferenciados

O início da aquisição dos dados georreferenciados consistiu na obtenção dos arquivos *shapefile* referentes as poligonais dos processos minerários em concessão de lavra das empresas produtoras de bauxita selecionadas previamente, disponíveis na plataforma do Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE), na página da Agência Nacional da Mineração (ANM) (SIGMINE (anm.gov.br)). Os dados foram processados no software de sistema de informações geográficas Qgis, na versão 3.10, para identificação e construção de mapas de localização das poligonais referentes a cada empresa. A construção dos mapas de localização teve o objetivo de permitir um conhecimento inicial sobre a área em concessão de lavra ocupada por cada empresa.

As imagens de satélite utilizadas para a construção dos mapas de análise multitemporal das áreas em estudo, foram obtidas por meio da plataforma Scihub da União Européia (scihub.copernicus.eu/dhus/#/home), que forneceu imagens do satélite Sentinel 2, entre os anos de 2018 a 2021. A escolha das imagens fundamentou-se no critério de seleção das cenas que apresentaram menor incidência de obstrução atmosférica, que ocorreu entre os meses de junho a dezembro. Para que não houvesse tantas interferências nos cálculos do NDVI, o início do processamento dos dados consistiu no tratamento das imagens raster adquiridas, esse tratamento compreendeu a realização do recorte das bandas utilizadas pelo NDVI através dos arquivos *Shapefiles* referentes a área de estudo de cada empresa, por meio da ferramenta recorte por camada de máscara do software Qgis.

3.3 Interpretação das imagens com o uso do NDVI

Para determinação do NDVI das áreas em estudo, foram utilizadas as bandas 4R e 8NIR, que trabalham com comprimento de onda visível na cor vermelha e no infravermelho próximo, respectivamente. Após isso, por meio da Equação 2.1 realizou-se o cálculo de

reflectância através da Calculadora Raster. Os valores dos pixels obtidos pelo NDVI foram computados em uma escala que varia entre -1 e +1, e classificados em 5 classes de intervalo, conforme mostrados no Quadro 2. Em que os valores próximos a +1 corresponderam às áreas de maior densidade de cobertura vegetal, os valores próximos a -1 indicaram ausência de vegetação e os valores próximos a zero corresponderam a áreas de solo exposto.

Quadro 2 – Classes de NDVI determinadas para a análise da área

Classes	Valores de NDVI	Classes NDVI
Água e superfícies não vegetais	-1 a 0	-1 a 0
Solo exposto	0 a 0,2	0 a 0,2
Baixa vegetação	0,2 a 0,4	0,2 a 0,4
Vegetação moderada	0,4 a 0,6	0,4 a 0,6
Alta vegetação	0,6 a 1	0,6 a 1

Fonte: Autora (2023)

3.4 Avaliação multitemporal das áreas produtoras de bauxita

A avaliação multitemporal das áreas compreendeu a realização de duas etapas, a primeira consistiu na realização de análises qualitativas por meio da confecção da série temporal de mapas temáticos para cada empresa através do *software* de sistema de informações geográficas Qgis, na versão 3.10. Posteriormente, as camadas que já haviam sido determinadas o NDVI foram vetorizadas por meio da ferramenta *r.tovect*, executada a partir da integração do SIG GRASS 7.8.5, e por meio de um arquivo de texto contendo os intervalos de classe do NDVI. O arquivo de texto foi o responsável por separar o arquivo vetorizado nos intervalos de classes, essa separação permitiu a realização das análises semi-quantitativas das áreas por meio da contabilização dos hectares para cada classe, com o uso da ferramenta de selecionar feições por área.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Seleção das empresas produtoras de bauxita

A análise dos anuários de produção mineral brasileiro das principais substâncias metálicas dos anos de 2018 a 2021 permitiu constatar que o estado do Pará é a unidade da federação com maior participação percentual na produção de alumínio (bauxita) do país. As principais empresas produtoras, se concentram nesse estado, o Quadro 3 apresenta suas respectivas participações percentuais ao decorrer dos anos citados. Foram selecionadas 3 empresas que obtiveram maior participação, a Mineração Rio do Norte possuiu a maior contribuição na produção nacional ao decorrer dos anos com em média 40,90% de participação, já a Mineração Paragominas possuiu a segunda maior participação com o percentual de 32,07% e a Alcoa World Alumina apareceu em terceiro lugar com uma média de 21,97%.

Quadro 3 – Participação percentual das empresas na produção nacional de alumínio (bauxita) entre os anos de 2018 a 2021

Participação percentual na produção nacional de alumínio (bauxita)				
Empresas Produtoras	2018	2019	2020	2021
Mineração Rio do Norte S. A.	47.61%	40.10%	39.38%	36.49%
Mineração Paragominas S. A.	24.96%	31.23%	32.85%	39.25%
Alcoa World Alumina Brasil Ltda	21.24%	23.29%	23.81%	19.56%

Fonte: Agência Nacional de Mineração (2023)

Por meio do SIGMINE foi possível identificar as poligonais dos processos de concessão de lavra de bauxita destas empresas, onde foram selecionadas para estudo as poligonais referentes às áreas que estão com operações de mina ativa. A Figura 13 mostra a localização das poligonais selecionadas da empresa Mineração Rio do Norte (MRN), que localizam-se no município de Oriximiná, oeste do Estado do Pará, a área estudada é composta por 8 poligonais de processos de concessão de lavra. A Figura 14 representa a localização das 6 poligonais selecionadas dos processos de concessão de lavra da Mineração Paragominas, que estão situadas no município de Paragominas no nordeste paraense. A Figura 15, apresenta a localização das poligonais selecionadas para a empresa Alcoa World Alumina, que estão

situadas dentro da Floresta Amazônica, no município de Juruti na fronteira entre os Estados do Pará e Amazonas, a área selecionada para estudo é composta por 3 poligonais em fase de concessão de lavra.

Figura 13 – Localização dos processos de bauxita selecionados da empresa Mineração Rio do Norte

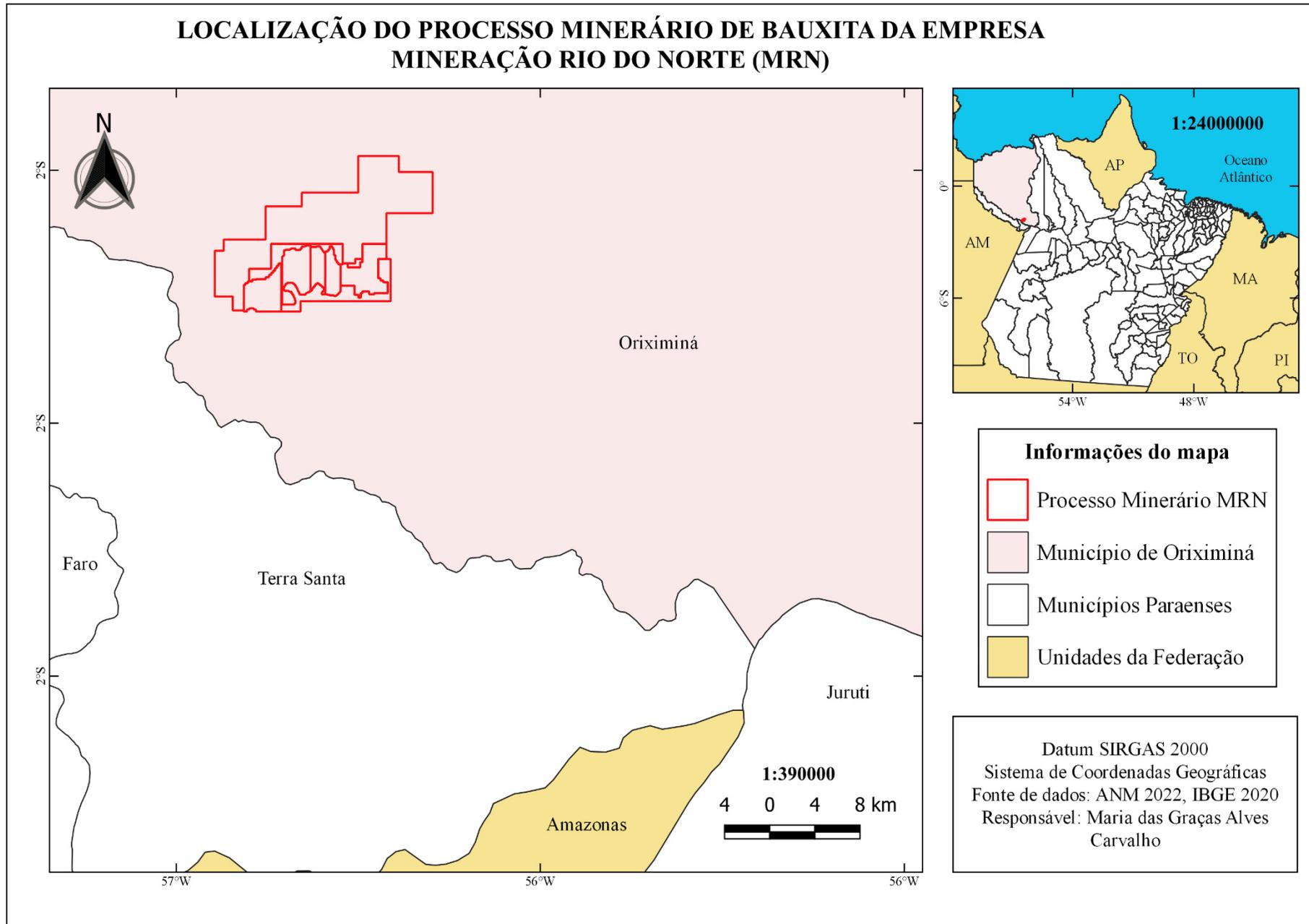
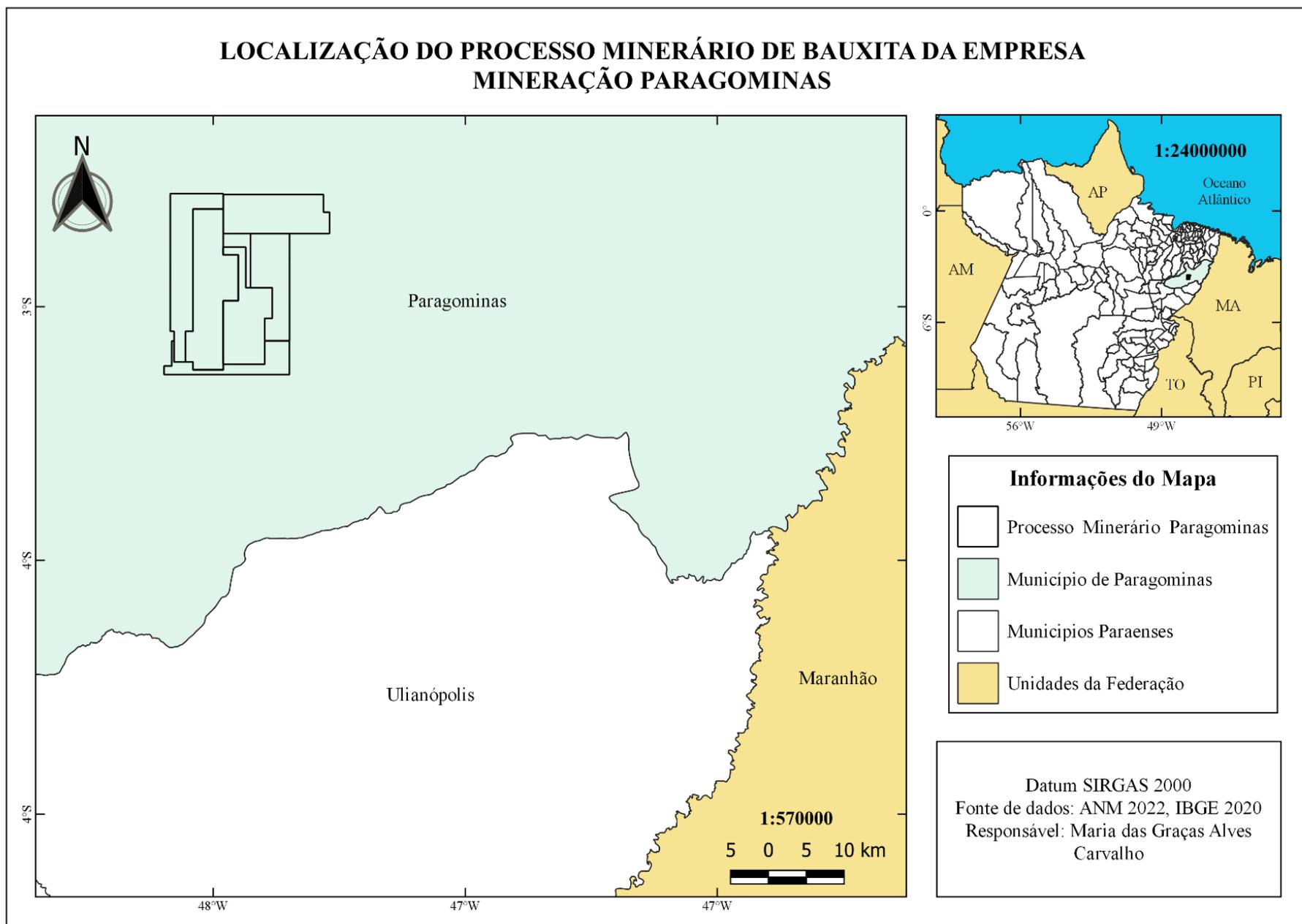
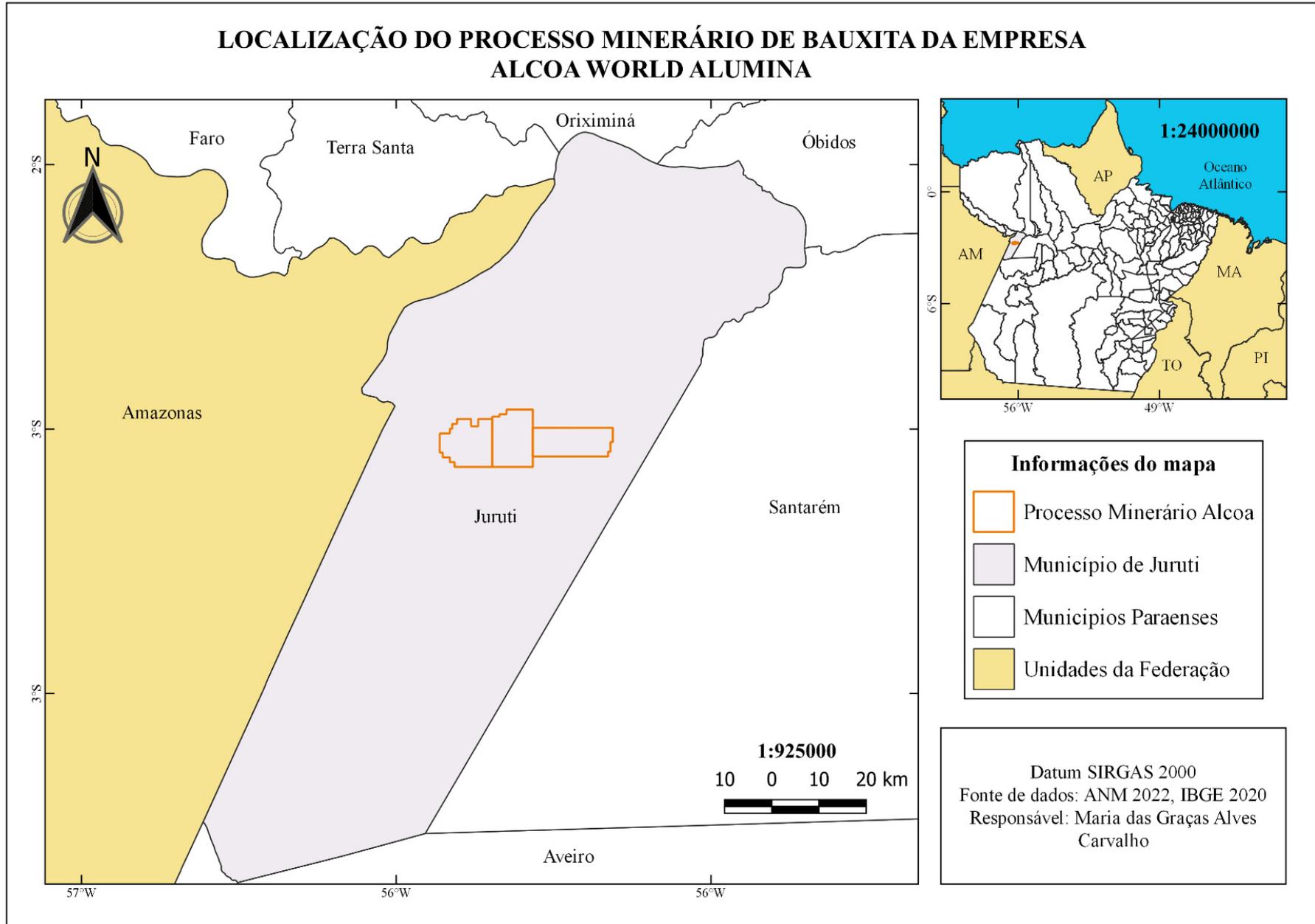


Figura 14 – Localização dos processos de bauxita selecionados da empresa Mineração Paragominas



Fonte: Autora (2023)

Figura 15 – Localização dos processos de bauxita selecionados da empresa Alcoa World Alumina



Fonte: Autora (2023)

4.2 Processamento dos dados georreferenciados e determinação do NDVI

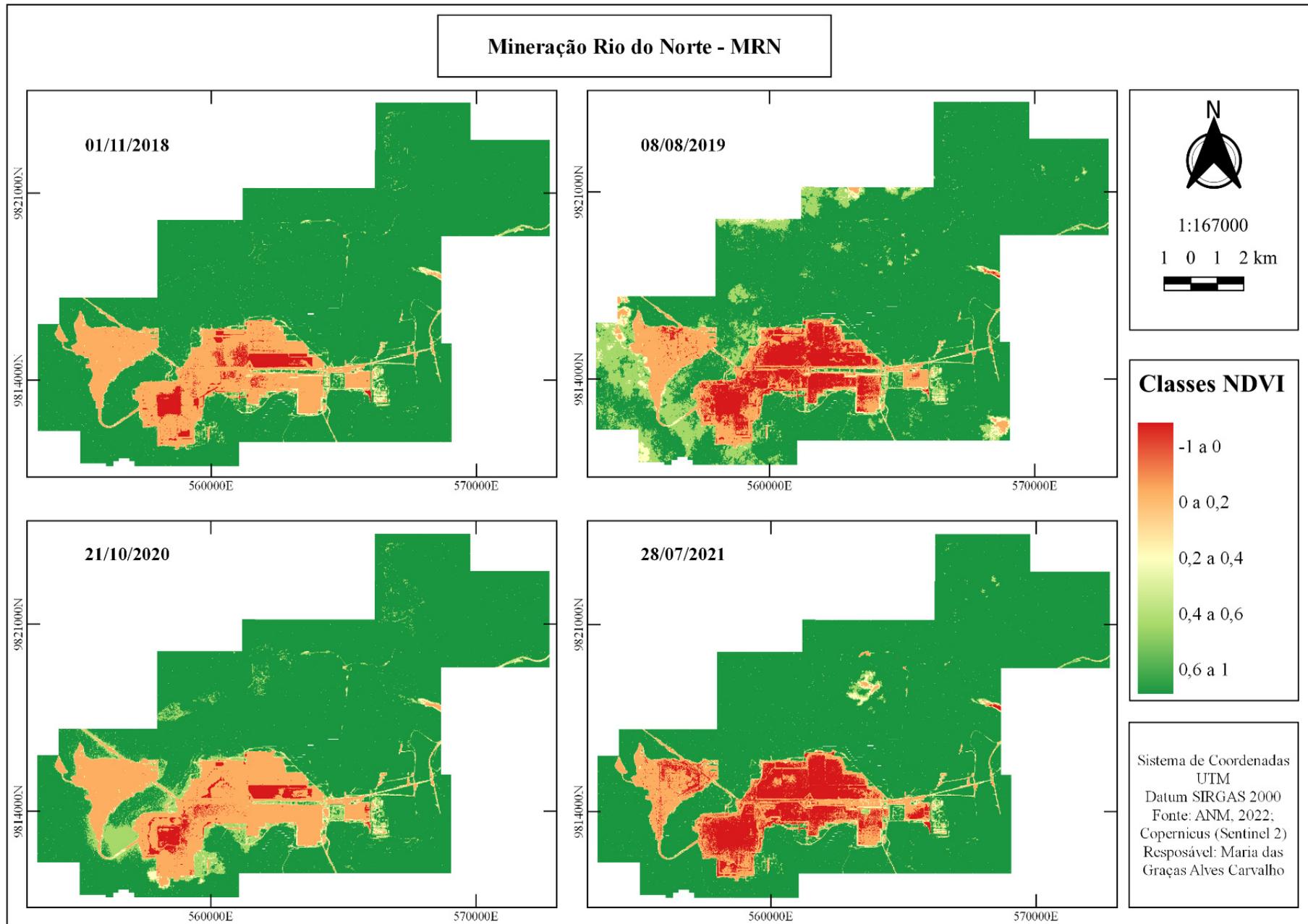
Neste item será apresentado e discutido os mapas idealizados com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

4.2.1 *Mineração Rio do Norte (MRN)*

A Figura 16 apresenta os mapas da série temporal da área do processo minerário da Mineração Rio do Norte, entre os anos de 2018 a 2021. Verificou-se nos mapas, cores que variam do vermelho ao verde segundo sua classificação de intervalo após o cálculo do NDVI. É possível observar que as datas das imagens registraram meses diferentes entre os anos avaliados. A motivação para isto, deu-se pela dificuldade em identificar janelas atmosféricas com a menor cobertura de nuvens sobre a área em estudo. À vista disso, nota-se que a imagem alusiva ao ano de 2019, apresentou uma elevada cobertura de nuvens, que dificultou a quantificação das classes do NDVI.

Além disso, a análise da Figura 16, permitiu identificar, visualmente, as classes de cobertura do NDVI para todos os anos, com destaque para a alta vegetação, que ocupou a maior parte da área, com tom de verde escuro. Verificou-se também um contorno característico da superfície ocupada pela empresa em tonalidade laranja, com porções na cor vermelha, que representam Solo exposto e Água e superfícies não vegetais, respectivamente. A coloração vermelha, em maior proporção para os anos de 2019 e 2021, pode associar-se ao período de obtenção das imagens entre os meses de julho e agosto que, provavelmente, está associada à saturação do solo ou à variação da intensidade da reflectância dos alvos. É importante destacar que as imagens mostraram variações sutis entre as classes de NDVI, sugerindo que a lavra da bauxita durante o período avaliado, ocorreu com avanço vertical.

Figura 16 – Análise multitemporal da Mineração Rio do Norte entre os anos de 2018 a 2021



Fonte: Autora (2023)

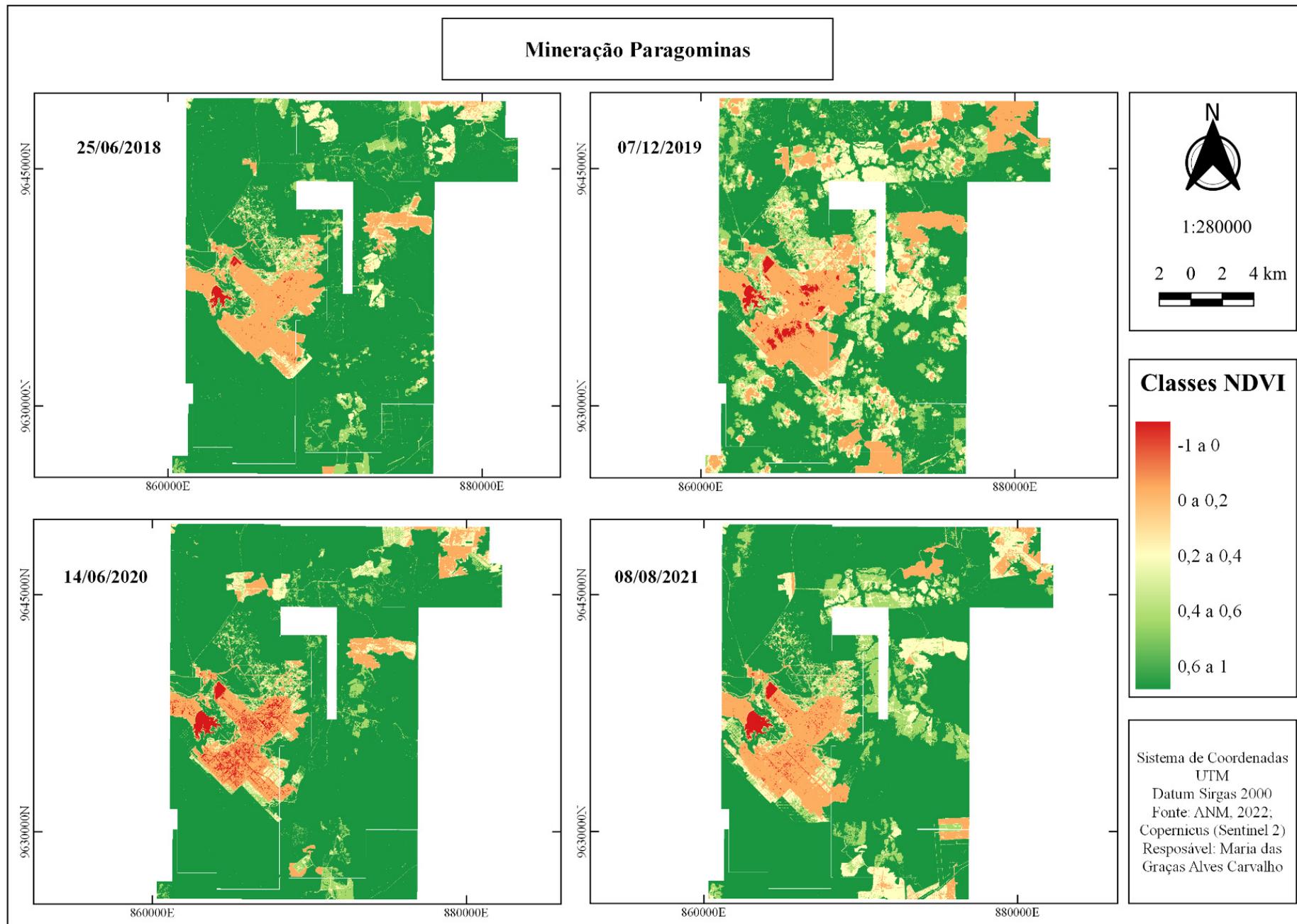
4.2.2 *Mineração Paragominas*

A Figura 17 mostra os mapas da série temporal da área da Mineração Paragominas ao decorrer dos anos de 2018 a 2021. É possível observar um recorte de coloração branca no centro das imagens, que corresponde a área requerida de uma outra empresa. Além disso, as imagens apresentaram variações nos meses de aquisição ao decorrer dos anos, isso é justificado pela dificuldade em identificar janelas atmosféricas com a menor cobertura de nuvens sobre a área em estudo. Nota-se que todas as imagens apresentaram incidências de nuvens, entretanto, o ano de 2019 não apresentou janela atmosférica que permitisse a análise da área através de imagens de satélite, pois a alta incidência de nuvens diminuiu a confiabilidade da técnica, dificultando a realização de uma interpretação precisa.

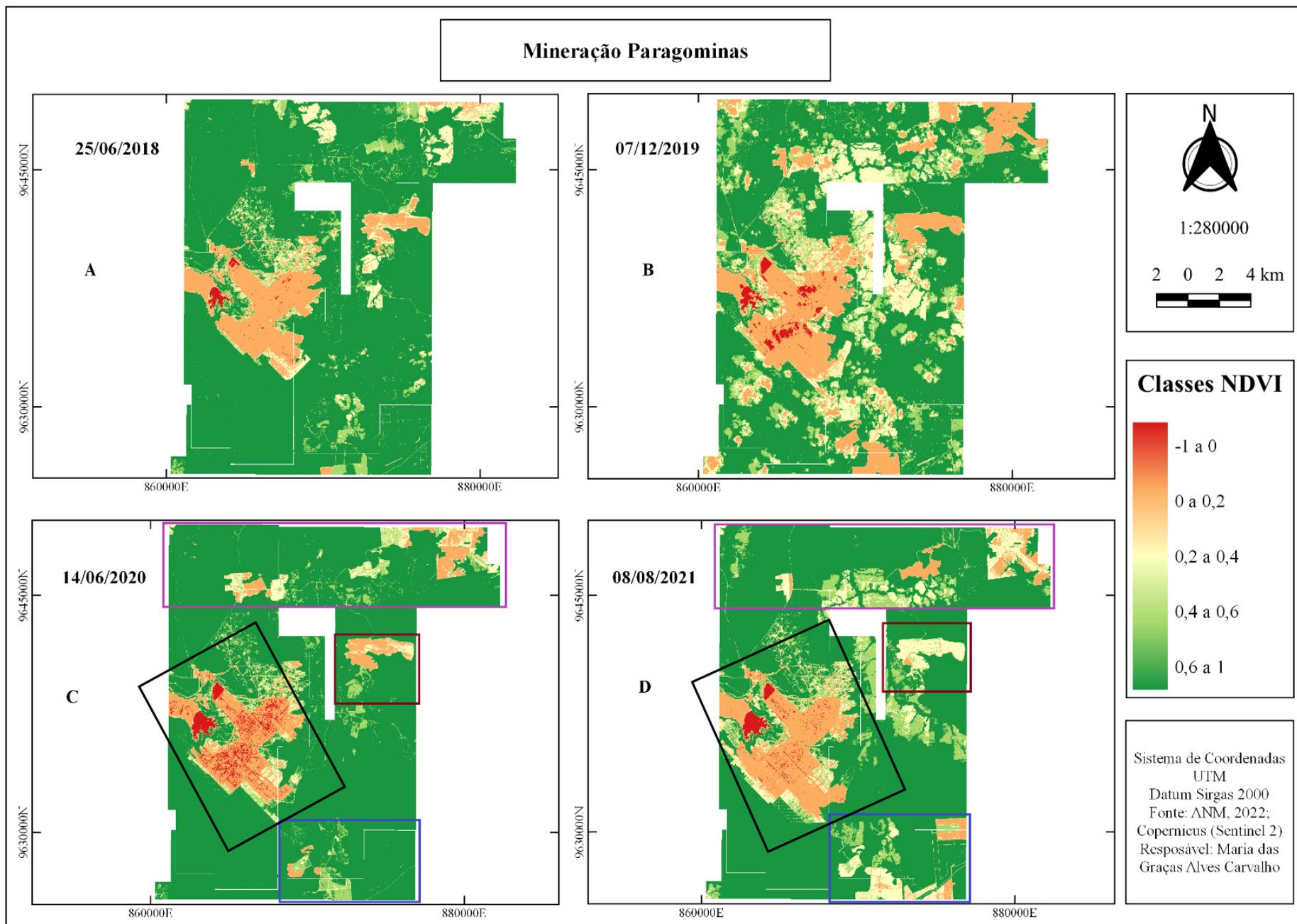
A análise da Figura 17 permitiu verificar cores que variam do vermelho ao verde segundo sua classificação de intervalo após o cálculo do NDVI, desta forma, é possível identificar, visualmente, as classes de cobertura do NDVI para todos os anos, com destaque para a Alta vegetação e Solo exposto, que ocupou a maior parte da área, com tom de verde escuro e laranja, respectivamente. Pode-se observar um contorno característico a área de lavra da superfície ocupada pela empresa em tonalidade laranja, com porções na cor vermelha, que representam Solo exposto e algumas superfícies não vegetais, como água.

As áreas em destaque nas Figuras 18C e 18D, referentes aos anos de 2020 e 2021, mostram que ocorreram mudanças no *layout* da paisagem qualitativa do NDVI. À vista disso, é possível identificar o aumento de áreas na tonalidade laranja para a Figura 18D que, provavelmente, está relacionada ao aumento da superfície de lavra da empresa. Por outro lado, verifica-se também regiões de tonalidade verde claro, entre as Figuras 18C e 18D, que podem indicar o início da recuperação ambiental das áreas lavradas.

Figura 17 – Análise multitemporal da Mineração Paragominas entre os anos de 2018 a 2021



Fonte: Autora (2023)

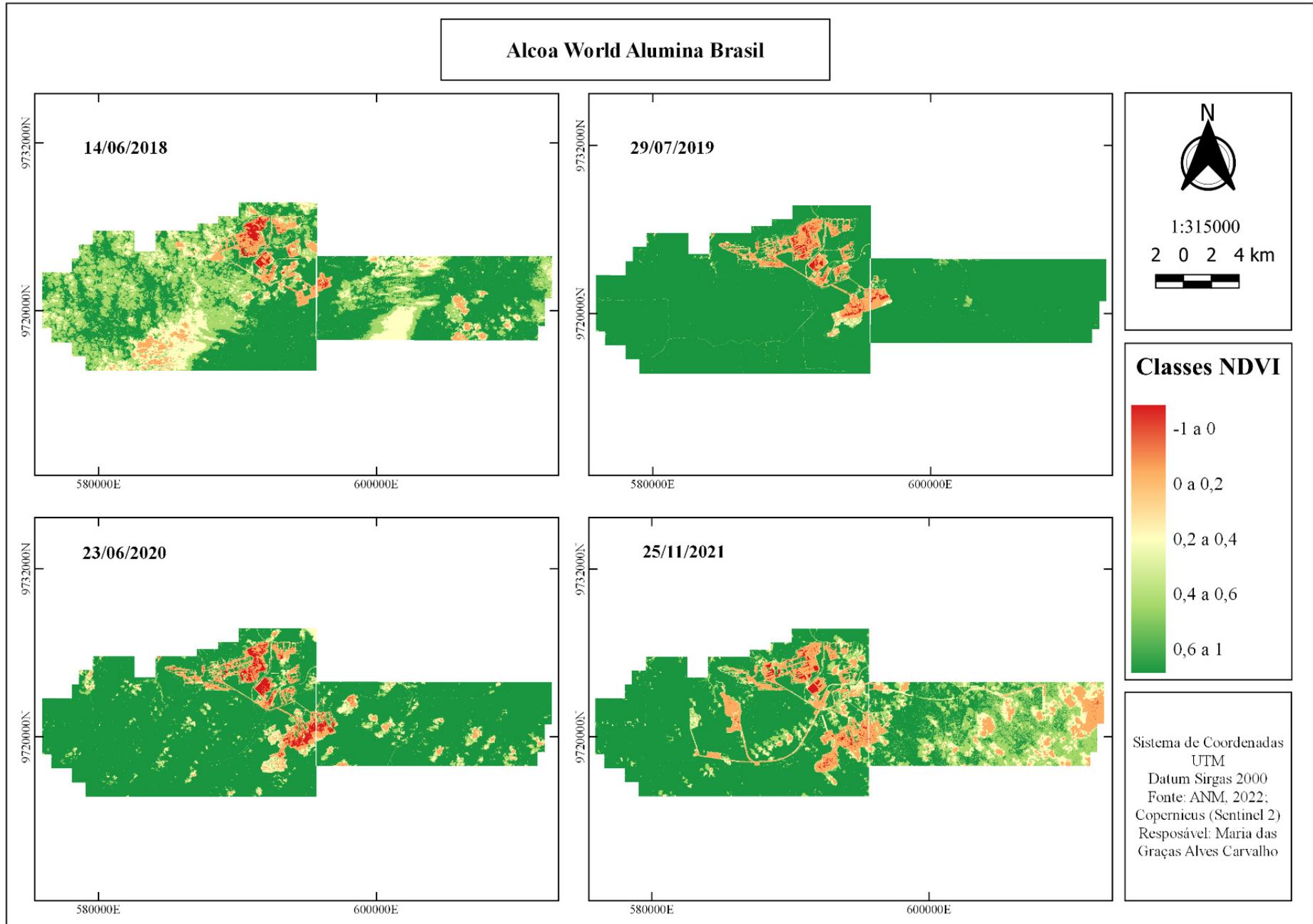


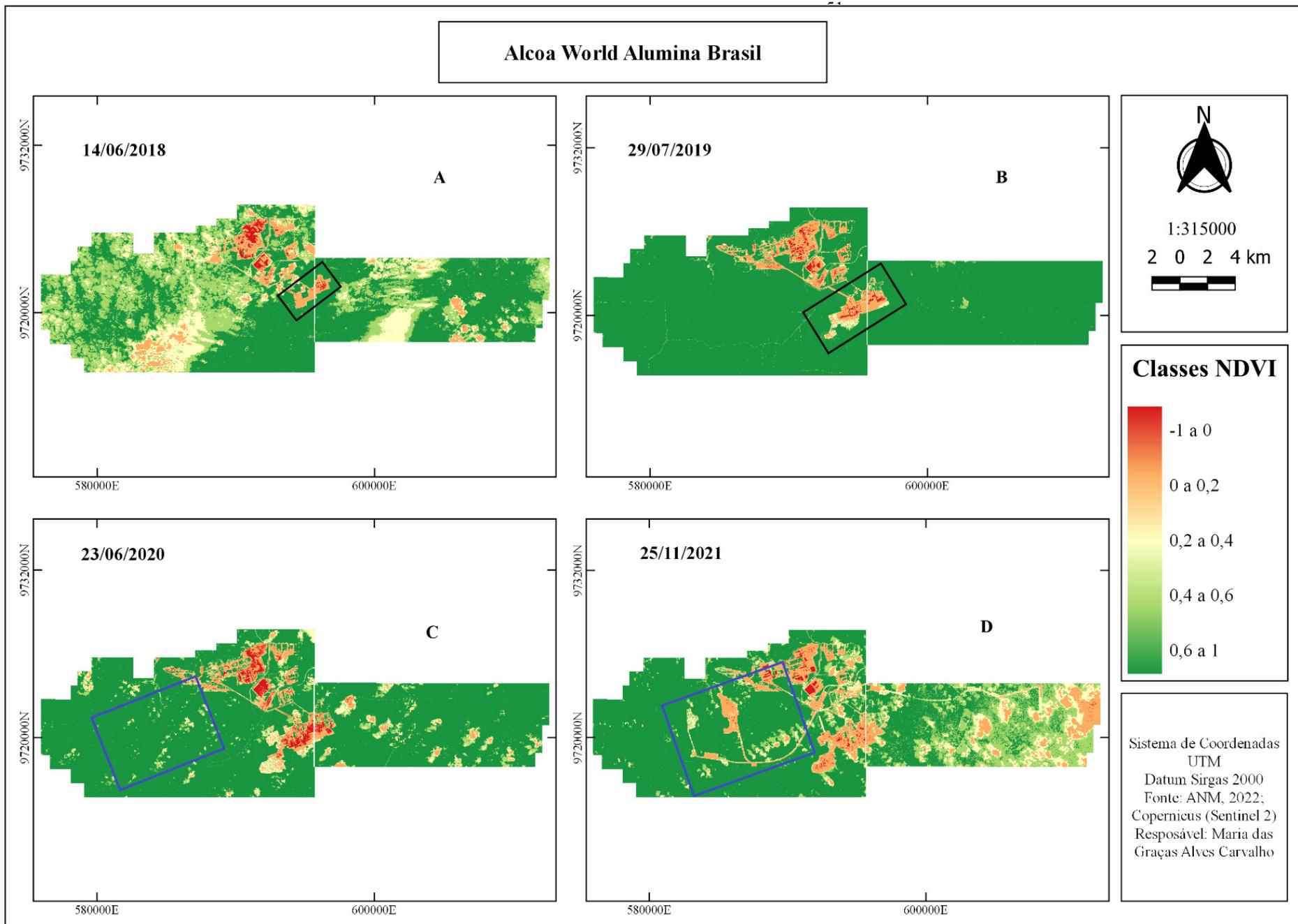
4.2.3 *Alcoa World Alumina*

A Figura 19 apresenta os mapas da série temporal da área do processo minerário da empresa Alcoa World Alumina entre os anos de 2018 a 2021. A análise visual desta área, apresentou grandes limitações, pois não houve janela atmosférica que permitisse a obtenção de imagens representativas da área sem coberturas de nuvens para o período avaliado, apenas o ano de 2019 apresentou cobertura atmosférica para obtenção de uma imagem límpida. É possível verificar nas imagens um contorno característico da superfície ocupada pela empresa em tonalidade laranja, com porções na cor vermelha, que representam solo exposto, água e superfícies não vegetais, respectivamente.

A análise da Figura 19, permitiu identificar, visualmente, as classes de cobertura do NDVI para todos os anos, facilitando na distinção das áreas de avanço de lavra que são predominantemente compostas por solo exposto, com tom de laranja, como também na identificação das áreas de floresta nativa que são, predominantemente, ocupadas por dosséis de árvores da floresta amazônica, com tom de verde escuro.

Mesmo com a intensa cobertura de nuvens nas imagens das Figuras 20A, 20B, 20C e 20D, é possível identificar, visualmente, o aumento da área de solo exposto em regiões que não são de cobertura de nuvens entre os anos de 2018 a 2021, esse aumento pode ser entendido como uma expansão da área de lavra de forma horizontal. No entanto, a elevada cobertura de nuvens nas imagens dos anos de 2018, 2020 e 2021 impossibilitou a quantificação das áreas de avanço por meio das classes do NDVI. Outro ponto que pode ser visualizado nas imagens das Figuras 20C e 20D é a criação de novos acessos e frentes de lavra entre os anos de 2020 a 2021.





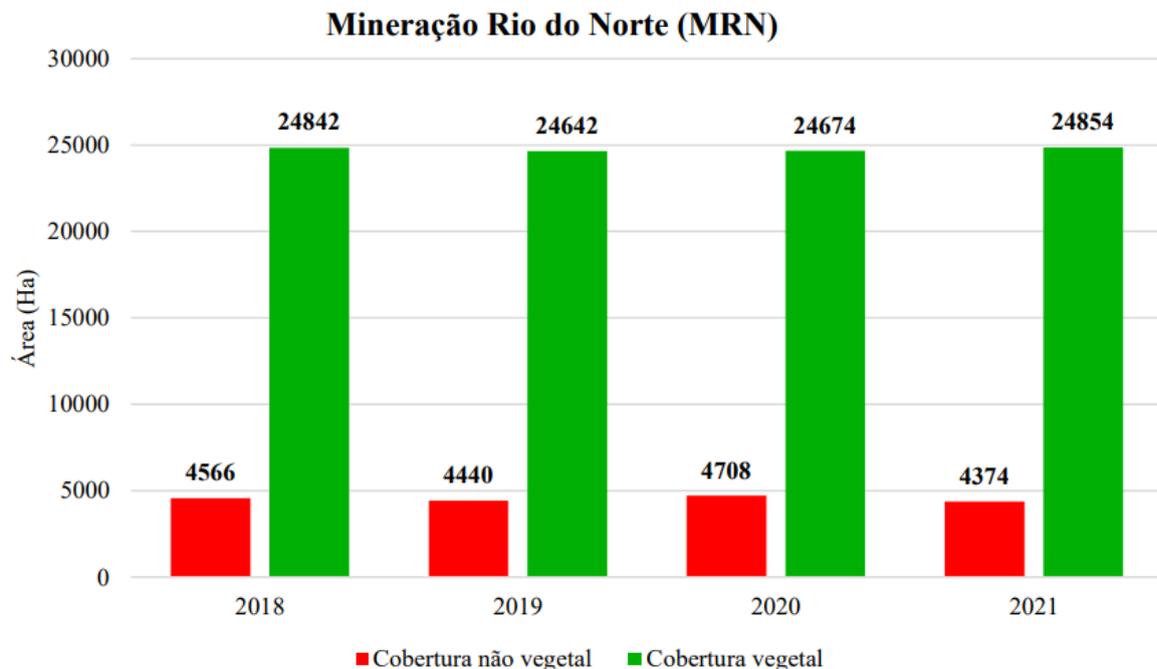
4.3 Avaliação multitemporal semi-quantitativa das áreas produtoras

4.3.1 Mineração Rio do Norte (MRN)

A análise semi-quantitativa da área do processo minerário da Mineração Rio do Norte ao decorrer dos anos de 2018 a 2021 foi avaliada por meio do Gráfico 01. Para fins de estudo desta pesquisa, tem-se destaque às áreas de vegetação moderada e solo exposto, pois normalmente representam áreas impactadas, além disso, o ano de 2019 será desconsiderado da avaliação, devido não ter apresentado janela atmosférica que permitisse uma quantificação precisa.

O Gráfico 01 categoriza as classes avaliadas em áreas de cobertura não vegetal e de cobertura vegetal. A análise do gráfico permitiu identificar que ao decorrer dos anos, as áreas que representaram cobertura vegetal, registraram áreas semelhantes, entre 24.600 a 24.860 hectares, com poucas variações, isso pode ser um indicativo que a ampliação horizontal das áreas de lavra vem ocorrendo de forma moderada, ou à medida que as áreas são expandidas, estão sendo recuperadas. Por isso, não há diferença perceptível, bem como, as áreas de baixa vegetação são constantes, com exceção de 2019, pois a cobertura de nuvens impossibilitou uma quantificação precisa.

Gráfico 01 – Análise semi-quantitativa Mineração Rio do Norte



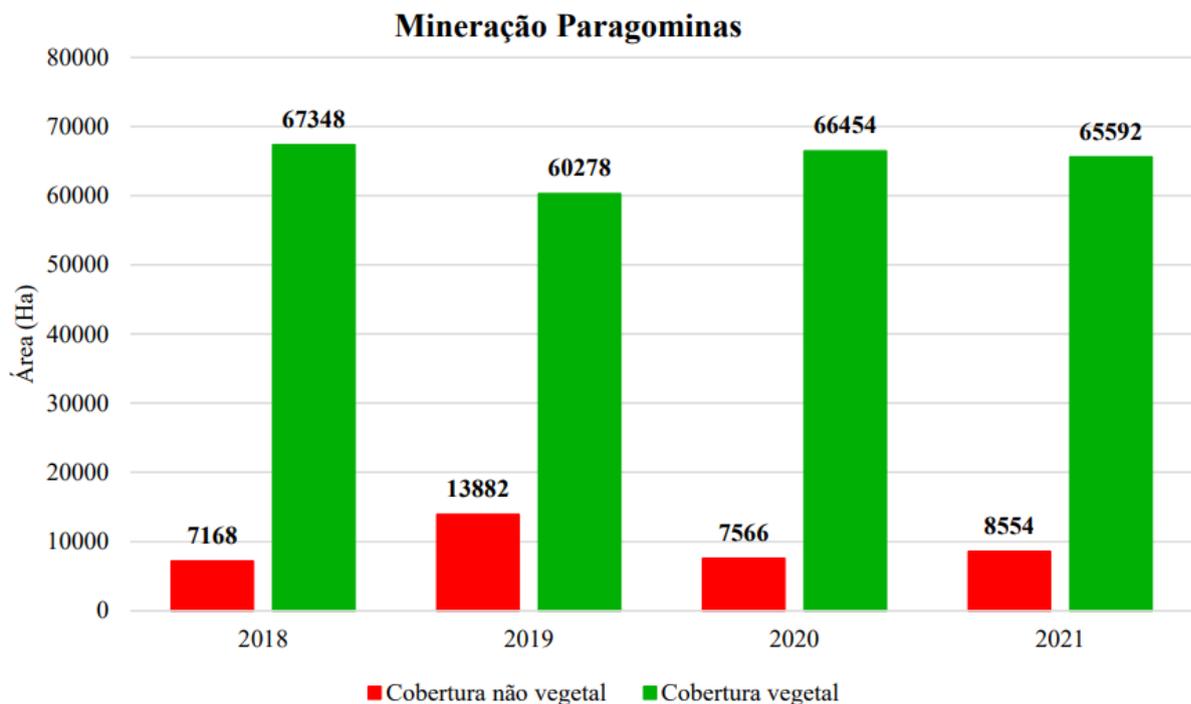
Fonte: Autora (2023)

O Quadro 04 disponível no Apêndice A mostra a divisão das classes de NDVI por hectare da Mineração Rio do Norte. Por meio dele é possível observar que o ano de 2020 apresentou aumento da área de vegetação moderada quando comparada ao ano de 2018, entretanto, para o ano de 2021 é perceptível aumento na área de alta vegetação, com maior presença de área verde, estas evidências podem ser indícios do crescimento da área revegetada em anos anteriores.

4.3.2 Mineração Paragominas

O Gráfico 02 apresenta a análise semi-quantitativa da área dos processos minerários da Mineração Paragominas ao decorrer dos anos de 2018 a 2021, as classes avaliadas foram categorizadas em áreas de cobertura não vegetal e de cobertura vegetal. O ano de 2019 será desconsiderado da avaliação, devido ter apresentado grande incidência de obstrução atmosférica que ocasiona maior imprecisão na quantificação das áreas.

Gráfico 02 – Análise semi-quantitativa Mineração Paragominas



Fonte: Autora (2023)

Por meio do Gráfico 02 é possível observar que entre os anos de 2020 a 2021 houve aumento nas áreas de cobertura não vegetal, isto pode indicar o aumento da superfície de lavra da empresa. Em contrapartida, mesmo com esse aumento, ao decorrer dos anos as áreas de cobertura vegetal não tiveram grandes mudanças, o que pode indicar a realização de recuperação ambiental imediata nas áreas lavradas.

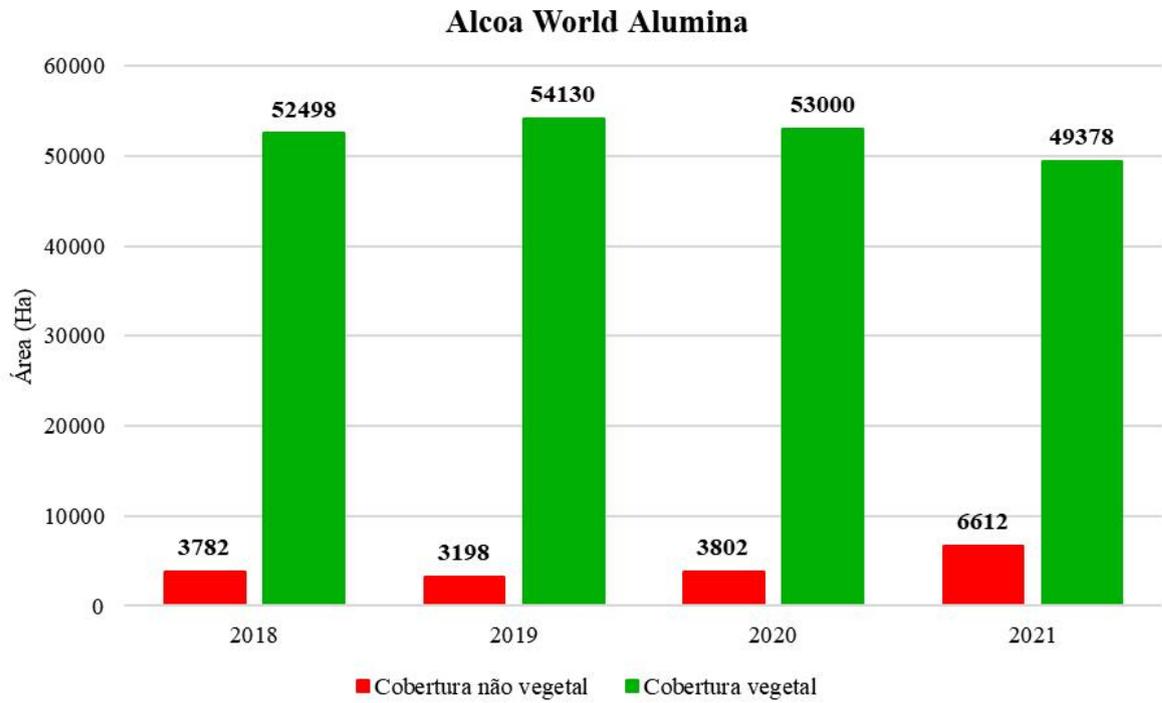
O Quadro 05 mostrado no Apêndice A, apresenta a divisão das classes de NDVI por hectare de área da Mineração Paragominas. Ao analisá-lo é possível perceber um aumento considerável nas áreas de baixa vegetação e vegetação moderada entre os anos de 2020 a 2021, isso pode representar o aumento das áreas que estão sendo desmatadas para avanço da lavra, ou o crescimento da vegetação das áreas que foram recuperadas em anos anteriores.

4.3.3 *Alcoa World Alumina*

A análise semi-quantitativa da área do processo minerário da Alcoa World Alumina ao decorrer dos anos de 2018 a 2021 apresentou grandes limitações em decorrência da intensa cobertura de nuvens para os anos de 2018, 2020 e 2021, o que impossibilitou uma quantificação precisa das áreas. O Gráfico 03 categoriza as classes avaliadas em áreas de cobertura não vegetal e de cobertura vegetal, por meio dele é possível observar grande discrepância entre os anos de 2020 a 2021 nas áreas de cobertura não vegetal. Estas discrepâncias justificam a dificuldade de quantificação das áreas por meio da técnica.

Além disso, o Quadro 06 mostrado no no Apêndice A, apresenta a divisão das classes de NDVI por hectare de área da Alcoa World Alumina, onde é possível observar que os valores de todas as classes apresentam muitas diferenças.

Gráfico 03 – Análise semi-quantitativa Alcoa World Alumina



Fonte: Autora (2023)

5 CONCLUSÃO

A análise dos anuários de produção mineral da ANM, permitiu identificar as principais empresas produtoras de minério de alumínio no Brasil entre os anos de 2018 a 2021. Dentre estas, selecionou-se as três empresas de maior participação, sendo estas, respectivamente: Mineração Rio do Norte, Mineração Paragominas e Alcoa World Alumina.

Por meio do NDVI foi possível analisar as áreas dos processos minerários das empresas nos diferentes anos estudados, entretanto o processo apresentou algumas limitações que se deram devido à grande incidência de nuvens na região estudada e a extensa área ocupada por cada empresa. Estas limitações reduziram a confiabilidade da técnica para análises quantitativas e qualitativas.

Na Mineração Rio do Norte foi possível observar ao decorrer dos anos de 2018 a 2021 variações sutis entre as classes de NDVI, sugerindo que a lavra da bauxita durante o período avaliado não apresentou aumento significativo de área horizontal. Nos anos de 2019 e 2021 foi possível observar maior proporção da coloração vermelha, que pode associar-se ao período de obtenção das imagens entre os meses de julho e agosto que, provavelmente, está associada à saturação do solo ou à variação da intensidade da reflectância dos alvos.

Para a Mineração Paragominas entre os anos de 2020 e 2021 identificou-se mudanças no layout da paisagem qualitativa do NDVI, que, provavelmente, está relacionada ao aumento da superfície de lavra da empresa e ao início da recuperação ambiental das áreas lavradas.

Já para a Alcoa World Alumina foi possível identificar, visualmente, ao decorrer dos anos de 2018 a 2021 o aumento da área de solo exposto em regiões que não estavam cobertas por nuvens, esse aumento pode ser entendido como uma expansão da área de lavra de forma horizontal, por meio da criação de novos acessos e frentes de produção de bauxita.

Em face ao exposto, pode-se concluir que o uso do NDVI para análise do impacto em áreas de lavra é recomendado para áreas que não possuam grande extensão, bem como para regiões que não possuam alto índice de obstrução atmosférica, sobretudo cobertura de nuvens que interferem na avaliação da superfície.

REFERÊNCIAS

ABAL ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Relatório Bauxita no Brasil: Mineração Responsável e Competitividade**. São Paulo, SP, 2017. 66 p.

ARAÚJO, E. R.. **Fechamento de minas no Brasil: aspectos legais e consequências sobre o meio ambiente e populações locais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2016. 52 p. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1964>. Acesso em: 21 jun. 2022.

BIZUTI, D. T. G.. **É possível reverter a degradação do solo provocada pela mineração de bauxita por meio da restauração florestal?** 2017. 87 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Escola de Agricultura "Luiz de Queiroz" Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

BOMFIM, M. R.. **Avaliação de Impactos Ambientais da Atividade Minerária**. Cruz das Almas, Bahia: UFRB, 2017. 46 p

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas 2019 ano base 2018**. Brasília, DF: ANM, 2019.35p.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas 2020 ano base 2019**. Brasília, DF: ANM, 2020.30p.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas 2021 ano base 2020**. Brasília, DF: ANM, 2021.23p.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas 2022 ano base 2021**. Brasília, DF: ANM, 2022.23p.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE(CONAMA). Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Resolução CONAMA N° 001**. Brasília, DF: Ibama, 1986.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; RIBEIRO, R. da R.. Sensoriamento remoto aplicado na detecção de áreas degradadas pela mineração no sul do Brasil entre 1985-2011. **Tecno-Lógica**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 97, 6 jul. 2016. APESC - Associação Pro-Ensino em Santa Cruz do Sul. <http://dx.doi.org/10.17058/tecnolog.v20i2.7369>.

CASARI, R. A. das C. N.. **Desenvolvimento de uma plataforma estabilizadora para aeronaves remotamente pilotadas visando a obtenção de índices de vegetação e sensoriamento remoto**. 2016. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, DF, 2016. Disponível em: <https://www.bdm.unb.br/handle/10483/14962>. Acesso em: 12 maio 2022.

CASTRO, P. de T. A.; NALINI JÚNIOR, H. A.; LIMA, H. M. de. **Entendendo a mineração no quadrilátero ferrífero: understanding mining around the quadrilátero ferrífero**. Belo Horizonte: Ecológico, 2011. 93 p.

CHAVES, A. P.. **Bombeamento de polpa e classificação**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 304 p.

CUNHA, A. M. B. da. et al. **Aspectos econômicos e sociais da atividade extrativa mineral: um olhar sobre os objetivos de desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro: CETEM: MCTIC, 2019. (Série Estudos e Documentos, 101).

CURI, A.. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 218 p.

CURI, A.. **Lavra de Minas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 774 p.

DAMASCENO, G. C.. **Geologia, mineração e meio ambiente.** Cruz das Almas, Bahia: UFRB, 2017. 64 p.

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Satélites de monitoramento: SENTINEL - Missão Sentinel.** 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel>. Acesso em: 12 jul. 2022.

FITZ, P. R.. **Geoprocessamento sem complicação.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 158 p.

FLORENZANO, T. G.. **Iniciação em Sensoriamento Remoto.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p.

GAMARRA, R. M.. et al. Uso do NDVI na análise da estrutura da vegetação e efetividade da proteção de unidade de conservação no cerrado. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise.** v. 37, p. 307 - 332, ago. 2016. ISSN 2177-2738. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/42454>. Acesso em: 01 set. 2023. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v37i0.42454>.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M.. **Introductory Mining Engineering.** 2. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2002. 584 p.

HYDRO ALUMÍNIO. **Mineração Paragominas.** 2023. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/paragominas/mineracao-paragominas/>. Acesso em: 07 jul. 2023.

LEITE, U. B.. **Os efeitos regionais da ‘Grande Mineração’:** a experiência do Norte de Goiás. 2013. 152 f., il. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

LINS, F. A. F.. Panorama das rochas e minerais industriais no Brasil. *In: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações.* 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 03-23.

LIU, W. T. H.. **Aplicações de sensoriamento remoto.** 2. ed. Campo Grande: Uniderp, 2006. 908 p.

LUZ, A. B.. (Ed.); SAMPAIO, J. A. (Ed.); ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). **Tratamento de Minérios** 2010. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

MACHADO, C. A. S.; QUINTANILHA, J. A.. **Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Geoposicionamento: Uma Aplicação Urbana**. Escola 78 Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2008.

MANCINI, L.; SALA, S.. Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. **Resources Policy**, p. 98-111. ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002>. Acesso em: 08 jul. 2022.

MARANHÃO, R. J. L.. **Introdução à pesquisa mineral**. 4. ed. Fortaleza: BNB. ETENE, 1985. 796 p.

MECHI, A.; SANCHES, D. L.. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142010000100016>.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, DF: Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, 2012. 266 p.

MINERAÇÃO RIO DO NORTE MRN. **Quem Somos**. 2023. Disponível em: <https://www.mrn.com.br/index.php/pt/quem-somos>. Acesso em: 07 jul. 2023.

MOREIRA, M. A.. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos, São Paulo: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), 2001. 246 p.

NOVO, E. M. L. de M.. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

PEREIRA, R. M.. **Fundamentos de prospecção mineral**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 167 p.

PHIRI, D.; et al. Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. **Remote Sensing**, v. 12, n. 14, 2020. Suíça. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/14/2291>. Acesso em: 13 jul. 2020.

PINTO, V. Q. R.. **Comportamento Geotécnico de Estéril de Bauxita e seu Potencial uso como Estrato de Fundação**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Publicação G.DM-327/2019, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019, 142 p.

REIS, L. L.. **Monitoramento da recuperação ambiental de áreas de mineração de bauxita na Floresta Nacional de Saracá-Taquera, Porto Trombetas (PA)**. 2006. 175 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2006.

SÁNCHEZ, L. E.; SILVA-SÁNCHEZ, S. S.; NERI, A. C.. **Guia para o Planejamento do Fechamento de Mina**. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2013. 225 p. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/>. Acesso em: 21 jun. 2022.

SANTOS, J. A. G.. **Recuperação e Reabilitação de Áreas Degradadas pela Mineração**. Cruz das Almas, Ba: UFRB, 2017. 44 p.

SILVA, L. A. Uma revisão de literatura sobre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no monitoramento de áreas degradadas por empreendimentos minerários. **Holos Environment**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 198–213, 2020. DOI: 10.14295/holos.v20i2.12375. Disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/12375>. Acesso em: 26 set. 2023.

THE EUROPEAN SPACE AGENCY. Sentinel Online. Paris, 2022. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em: 13 jul. 2022.

APÊNDICES A – TABELAS CLASSIFICAÇÃO NDVI

Quadro 4 – Divisão das classes de NDVI por hectare da Mineração rio do Norte

Mineração Rio do Norte				
Classes	Somatório das áreas (Ha)			
	2018	2019	2020	2021
-1 a 0 (Água e superfícies não vegetais)	564	1838	446	2118
0 a 0,2 (Solo exposto)	4002	2602	4262	2256
0,2 a 0,4 (Baixa vegetação)	174	452	198	178
0,4 a 0,6 (Moderada vegetação)	266	2490	1322	248
0,6 a 1 (Vegetação alta)	24402	21700	23154	24428

Fonte: Autora (2023)

Quadro 5 – Divisão das classes de NDVI por hectare da Mineração Paragominas

Mineração Paragominas				
Classes	Somatório das áreas (Ha)			
	2018	2019	2020	2021
-1 a 0 (Água e superfícies não vegetais)	226	742	838	454
0 a 0,2 (Solo exposto)	6942	13140	6728	8100
0,2 a 0,4 (Baixa vegetação)	3342	9598	2388	5814
0,4 a 0,6 (Moderada vegetação)	3678	9456	2882	6180
0,6 a 1 (Vegetação alta)	60328	41224	61184	53598

Fonte: Autora (2023)

Quadro 6 – Divisão das classes de NDVI por hectare da Alcoa Word Alumina

Alcoa Word Alumina				
Classes	Somatório das áreas (Ha)			
	2018	2019	2020	2021
-1 a 0 (Água e superfícies não vegetais)	440	300	806	344
0 a 0,2 (Solo exposto)	3342	2898	2996	6268
0,2 a 0,4 (Baixa vegetação)	6714	330	1642	4054
0,4 a 0,6 (Moderada vegetação)	16934	212	2492	9170
0,6 a 1 (Vegetação alta)	28850	53588	48866	36154

Fonte: Autora (2023)