

Universidade do Estado do Pará  
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia  
Curso de Graduação em Engenharia Florestal



Matheus Lima Souza  
Tiago Almeida Vieira

**Eficiência do uso de índices espectrais ajustados ao solo  
para avaliação da degradação e recuperação vegetal em  
área de mineração no Município de Ipixuna (PA)**

Belém  
2023

Matheus Lima Souza

Tiago Almeida Vieira

**Eficiência do uso de índices espectrais ajustados ao solo  
para avaliação da degradação e recuperação vegetal em  
área de mineração no Município de Ipixuna (PA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito  
para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal  
da Universidade do Estado do Pará.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Norma Ely Santos Beltrão

Co-orientadora: MSc. Fernanda Ferreira Machado

Belém

2023

Matheus Lima Souza

Tiago Almeida Vieira

## **Eficiência do uso de índices espectrais ajustados ao solo para avaliação da degradação e recuperação vegetal em área de mineração no Município de Ipixuna (PA)**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal da Universidade do Estado do Pará.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Norma Ely Santos Beltrão

Co-orientadora: Msc. Fernanda Ferreira Machado


Data de aprovação: 25/08/2023

### **BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **NORMA ELY SANTOS BELTRAO**  
Data: 02/10/2023 20:21:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


\_\_\_\_\_ - Orientadora

Prof. Dra. Norma Ely Santos Beltrão  
Doutorado em Economia Agrícola e Desenvolvimento Rural – UEPA

Documento assinado digitalmente  
 **PAULO AMADOR TAVARES**  
Data: 03/10/2023 10:01:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

\_\_\_\_\_ - Examinador (1)

Prof. Dr. Paulo Amador Tavares  
Doutorado em Ciências Ambientais - UFRA

Documento assinado digitalmente  
 **CLAUDIA VIANA URBINATI**  
Data: 06/10/2023 10:23:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

\_\_\_\_\_ - Examinadora (2)

Prof. Dra. Cláudia Viana Urbinati  
Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira - UEPA

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela nossa vida, e por nos ajudar a ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso.

Eu, Tiago de Almeida Vieira, expresso minha gratidão aos meus pais e irmãos, cujo apoio, nos momentos difíceis, foi fundamental, e que compreenderam minha ausência, enquanto me dedicava à realização deste trabalho. Quero também reconhecer o constante auxílio da minha avó materna, que sempre esteve presente para me apoiar, sem medir esforços, na busca pelos meus sonhos. Agradeço ainda aos meus avós paternos, que me acolheram em seu lar e contribuíram significativamente para a concretização deste objetivo. Não posso deixar de mencionar o apoio inabalável dos meus primos, Mayllon Vieira e Adryane Vieira, que acompanharam de perto essa jornada ao longo dos anos e sempre me incentivaram a perseverar, sem desistir. Por último, mas não menos importante, gostaria de expressar minha gratidão ao meu grande amigo Matheus Lima, por ter aceitado se juntar a mim nessa emocionante jornada.

Eu, Matheus Lima Souza, quero expressar minha gratidão aos meus pais, Pilar e Alan. Vocês sempre foram a base sólida sobre a qual construí meus sonhos. Cada sacrifício que fizeram não passou despercebido, e este trabalho é uma celebração do investimento emocional e financeiro que fizeram em minha jornada acadêmica. Cada etapa deste percurso foi marcada pela presença e apoio incansável de pessoas que se dedicaram a me impulsionar e inspirar. Com profunda emoção, desejo expressar meus mais sinceros agradecimentos. Ao meu amigo Tiago de Almeida, agradeço por estar ao meu lado nesta jornada. Juntos, enfrentamos desafios e compartilhamos vitórias, e essa experiência não teria sido a mesma estando sozinho.

Expressamos nossa profunda gratidão à nossa professora e orientadora, Norma Ely Santos Beltrão, bem como à nossa co-orientadora, Fernanda Ferreira Machado. Queremos reconhecer e valorizar imensamente o aprendizado que adquirimos com elas, assim como a paciência, assistência e competência que demonstraram ao longo da realização deste trabalho. Seus conhecimentos desempenharam um papel fundamental em nossa jornada de formação como engenheiros Florestais. Além disso, não podemos deixar de mencionar a Universidade do Estado do Pará (UEPA), cujo apoio incansável foi vital em cada etapa dessa jornada.

SOUZA, Matheus Lima; VIEIRA, Tiago Almeida. **Eficiência do uso de índices espectrais ajustados ao solo para avaliação da degradação e recuperação vegetal em área de mineração no Município de Ipixuna (PA)**31p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Engenharia Florestal) - Universidade do Estado do Pará, Belém - PA, 2023.

## RESUMO

Nas últimas décadas, a indústria de mineração tem se expandido no Brasil, especialmente no estado do Pará. Apesar de suas contribuições socioeconômicas, essa atividade, frequentemente, negligencia impactos ambientais e sociais, como evidenciado por recentes tragédias, nos noticiários nacionais e internacionais. Neste contexto, este estudo buscou identificar áreas degradadas e em recomposição por exploração mineral, no município de Ipixuna do Pará, para os anos de 2017, 2020 e 2022, usando, para isso, ferramentas de sensoriamento remoto, tais como: Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado (MSAVI), obtidos através de imagens capturadas pelo satélite *Landsat 8*. Duas áreas impactadas pela mineração foram selecionadas para análise, ambas operadas por uma empresa de transformação mineral. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto foram utilizadas para gerar mapas e analisar os dados. A análise dos dados mostrou diferenças de qualidade entre SAVI e MSAVI. Para este último índice foi apresentado desempenho superior de análise, porém ambos foram considerados satisfatórios para análises com destaque para o formato rápido de processamento e tendo baixo custo. Com base nesses resultados e na necessidade de supervisão para conter a deterioração florestal, este estudo apresenta os índices testados como uma possibilidade econômica e viável para monitorar o estado de conservação, degradação e regeneração das florestas. Esta forma, contribui positiva e significativamente para formulação de políticas públicas de vigilância e restauração ambiental, no município de Ipixuna do Pará.

**Palavras-chave:** Meio ambiente; Degradação florestal; Mineração, Sensoriamento remoto.

SOUZA, Matheus Lima; VIEIRA, Tiago Almeida. **Efficiency of the use of soil-adjusted spectral indices for the assessment of vegetation degradation and recovery in a mining area in the Municipality of Ipixuna (PA). 2023. 31p.** Undergraduate Thesis (Forestry Engineering) - State University of Pará, Belém - PA, 2023.

#### **ABSTRACT**

In recent decades, the mining industry has expanded in Brazil, especially in the state of Pará. Despite its socio-economic contributions, this activity often neglects environmental and social impacts, as evidenced by recent tragedies in national and international news. In this context, this study aimed to identify degraded and recovering areas due to mineral exploration in the municipality of Ipixuna do Pará for the years 2017, 2020, and 2022. This was done using remote sensing tools such as the Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) and the Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI), obtained through images captured by the Landsat 8 satellite. Two mining-affected areas, both operated by a mineral transformation company, were selected for analysis. Geoprocessing and remote sensing techniques were used to generate maps and analyze the data. Data analysis showed differences in quality between SAVI and MSAVI, with the latter index demonstrating superior analytical performance. However, both were considered satisfactory for analysis, highlighting their fast processing and low cost. Based on these results and the need for supervision to mitigate forest deterioration, this study presents the tested indices as an economically viable possibility for monitoring the state of conservation, degradation, and regeneration of forests. In this way, it makes a positive and significant contribution to the formulation of public policies for environmental monitoring and restoration in the municipality of Ipixuna do Pará.

**Keywords:** Environment. Forest degradation. Mining. Remote sensing.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
2.1. Objetivo geral .....	10
2.2. Objetivos específicos.....	11
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>11</b>
3.1. Degradação do solo .....	11
3.2. Recuperação de áreas degradadas pós-mineração.....	12
3.3. Tipos de impactos na área de mineração de Ipixuna do Pará.....	13
3.4. Uso do sensoriamento remoto para análise de degradação vegetal natural.....	15
<b>4. MATERIAS E MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
4.1 Seleção do Local de Estudo.....	17
4.2 Aquisição dos dados espaciais e seleção de imagens .....	18
4.4 Obtenção de Índices de Vegetação Processados. ....	19
4.5 Download dos Produtos Processados e Processamento das Imagens.....	19
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>30</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização do município de Ipixuna do Pará – PA... ..	17
Figura 2 - Mapeamento da área 1 nos anos 2017, 2020 e 2022 utilizando RGB 762... ..	21
Figura 3 – Aplicação do índice SAVI na área 1 nos anos 2017, 2020 e 2022... ..	22
Figura 4 – Aplicação do índice MSAVI na área 1 nos anos 2017, 2020 e 2022... ..	22
Figura 5 – Mapeamento da área 2 nos anos 2017, 2020 e 2022 utilizando RGB 762... ..	26
Figura 6 – Aplicação do índice SAVI na área 2 nos anos 2017, 2020 e 2022... ..	27
Figura 7 – Aplicação do índice MSAVI na área 2 nos anos 2017, 2020 e 2022... ..	27

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DETER	Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real
EIA	Estudos de Impacto Ambientais
ESPA	<i>Science Processing Architecture</i>
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
MSAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
PRAD	Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
RAD	Recuperação de Áreas Degradadas
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
SR	Sensoriamento remoto
SRC	Sistema de referência de coordenadas
USGS	United States Geological Survey

## 1. INTRODUÇÃO

A biodiversidade da Amazônia é amplamente reconhecida em todo o mundo, e essa região consiste em uma vasta extensão de floresta tropical úmida, rica em recursos hídricos. Esta desempenha um papel significativo, tanto na sociedade, quanto na economia local, nacional e global. No entanto, para que esses benefícios se concretizem de maneira sustentável, é imperativo que a atividade mineradora seja conduzida com responsabilidade e consideração pelos impactos ambientais e sociais, garantindo assim a preservação de sua integridade e a continuidade de sua contribuição positiva para a sociedade e a economia. (BEMERGUY, GUEDES; PIMENTEL, 2020). Além disso, dados fornecidos pelo MapBiomas, o qual é uma iniciativa que utiliza imagens de satélite e sensoriamento remoto para mapear e monitorar as mudanças na cobertura e uso da terra, indicam um rápido aumento na atividade de mineração na Amazônia, ao longo dos últimos 37 anos (MAPBIOMAS, 2022).

De acordo com dados fornecidos pela Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas, o Estado do Pará ocupa a segunda posição na produção mineral do Brasil, destacando-se a exportação de minério de ferro da região (FAPESPA, 2017). Na década de 1970, foram encontrados depósitos de caulim nas proximidades do rio Capim, em Ipixuna do Pará. No entanto, foi somente em 1990 que a atividade ganhou relevância com a atuação da Pará Pigmentos S.A (PPSA), seguida pela Imerys Rio Capim Caulim (IRCC). Cerca de uma década depois, a IRCC adquiriu a PPSA, consolidando-se como a maior unidade de beneficiamento de caulim, não apenas na região paraense, mas também no mundo (IMERYS CAULIM, 2019).

A mineração de caulim em Ipixuna do Pará é estrategicamente importante devido à sua considerável contribuição para a economia do estado, sendo um dos principais polos de produção desse mineral no Brasil. A produção de caulim na região tem alcançado níveis expressivos, representando uma parte substancial do Produto Interno Bruto (PIB) local e contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico de Ipixuna do Pará e áreas circundantes (CARNEIRO et al., 2003).

Ao longo da história, a degradação florestal causada pela atividade mineral resultou em perdas significativas de biodiversidade e serviços ecossistêmicos florestais (BEUCHLE et

al., 2022). Essa degradação tem várias causas, incluindo a exploração seletiva de madeira, incêndios florestais e a fragmentação das bordas das florestas. Quando a degradação ambiental excede a capacidade natural de regeneração de um ecossistema, ocorre um desequilíbrio entre seus componentes bióticos, abióticos, químicos e físicos (DUARTE et al., 2017). Nesse contexto, a restauração e recuperação do equilíbrio ambiental em ecossistemas degradados requer intervenção humana, por meio de técnicas como o plantio de mudas, a regeneração natural e a nucleação (BARBOSA, 2021).

O sensoriamento remoto, com destaque para o uso dos índices Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado (MSAVI), avalia a saúde e a densidade da vegetação, em uma determinada área, e desempenha um papel crucial no contexto de Ipixuna do Pará, onde se torna essencial realizar a detecção e monitoramento de mudanças na cobertura do solo relacionadas à mineração. Os índices são ferramentas que possibilitam a identificação de áreas afetadas pela degradação florestal, provocada pela atividade mineradora, bem como, facilita a análise da avaliação da extensão dos danos e o acompanhamento da recuperação da vegetação, após o encerramento das operações de mineração (PAULA, 2015).

Essa abordagem é fundamental para estabelecer limites territoriais, regulamentar o uso e ocupação do território e definir métodos e objetivos de manejo que levem em consideração as peculiaridades socioambientais da região, contribuindo, assim, para alcançar um equilíbrio desejável entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental na área (MELETI, 2012).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

A analisar a degradação florestal ocorrida, no município de Ipixuna do Pará, no período de 2017 a 2022, resultante da atividade mineral, utilizando dados de perda de cobertura florestal e expansão mineral, a fim de compreender a relação entre a degradação do solo e a atividade mineral, com foco na identificação dos impactos causados por essa interação.

## **2.2. Objetivos específicos:**

- Identificar a dinâmica espacial da cobertura vegetal, na área de estudo, e delinear as zonas afetadas pela atividade mineral como forma de antropização;
- Mapear e analisar as áreas de estudo que sofreram degradação entre os anos de 2017 e 2022, considerando os efeitos da atividade mineral;
- Comparar, através de interpretação visual, o desempenho dos índices espectrais SAVI e MSAVI, nas áreas selecionadas, a fim de identificar a degradação e a recuperação da área degradada.

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1. Degradação do solo**

A atividade mineradora desempenha um papel significativo no equilíbrio econômico, na geração de empregos e no PIB (IBRAM, 2021). No Brasil, a atividade mineradora é essencial para a economia devido à riqueza do solo em minérios de ferro, bauxita, ouro e nióbio. Esses recursos são vitais para indústrias como: siderurgia, alumínio, joias e tecnologia. A mineração também cria empregos e melhora a infraestrutura local, mas enfrenta desafios ambientais e sociais, exigindo um equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental (PEREIRA, 2021).

O solo é um recurso vital para o planeta, fundamentando a vida de todos os organismos terrestres (SILVA, 2019). Contudo, sua exploração intensa resulta em diversos impactos, incluindo problemas ambientais, econômicos e sociais. De acordo com Silva (2020), uma parte significativa dos solos globais estão sofrendo degradação, resultado de práticas agrícolas insustentáveis, urbanização acelerada, desmatamento e mudanças climáticas. Conforme Trindade (2023) a degradação compromete a capacidade da terra de sustentar a agricultura e a biodiversidade, representando uma ameaça à segurança alimentar e à saúde ambiental. Para enfrentar esse desafio, é crucial adotar práticas agrícolas sustentáveis e métodos de recuperação de áreas afetadas pela mineração, promover a conservação do solo e tomar medidas para mitigar as mudanças climáticas, visando garantir a sustentabilidade a longo prazo.

A atividade mineral pode representar uma fonte considerável de poluição ambiental, uma vez que a liberação de substâncias tóxicas, como metais pesados, para o meio ambiente

está intrinsecamente relacionada ao tipo de empreendimento em questão. Esses metais afetam negativamente plantas e microrganismos, que desempenham um papel crucial nos ecossistemas (LAAOUIDI et al., 2020).

O processo erosivo, caracterizado pela desagregação da estrutura do solo e pela remoção de partículas, frequentemente tem início com as menores partículas do solo. Isso ocorre porque essas partículas de tamanho reduzido são mais suscetíveis ao transporte por agentes erosivos como a água e o vento, facilitando o processo de degradação do solo (SANTOS, 2017). A extração mineral contribui para o aumento da erosão, devido à remoção da cobertura vegetal para operações de mineração e disposição de resíduos, expondo o solo a fatores erosivos e aumentando o risco de assoreamento dos corpos d'água, bem como a contaminação por elementos tóxicos (SILVA, 2018).

De acordo com Costa (2022), as regiões de mineração tendem a apresentar declínio contínuo no estoque de carbono, devido aos efeitos degradantes. Processos erosivos, como erosão hídrica e eólica, removem sedimentos do solo, ricos em carbono orgânico. Ademais, mudanças no relevo também afetam o estoque de carbono do solo, já que declives mais acentuados contribuem para danos erosivos mais severos (JUŘICOVÁ et al., 2022).

A recuperação de áreas degradadas, por atividade mineral, desempenha um papel fundamental, representando uma iniciativa essencial para conferir um novo propósito sustentável a esses locais após o término das operações de mineração (DE OLIVEIRA, 2022).

### **3.2. Recuperação de áreas degradadas pós-mineração:**

O conceito de degradação refere-se a impactos ambientais negativos causados por intervenções humanas, não considerando alterações naturais. O conceito varia conforme a área afetada e o campo de estudo (BRASIL, 1981). As áreas degradadas originam-se de diversas fontes, como mineração, erosão do solo, falta de vegetação e deposição de lixo (LEMOS et al., 2017).

A Constituição Federal de 1988 estabelece a obrigatoriedade de Recuperação de Áreas Degradadas (RAD) pela exploração de recursos minerais (BRASIL, 1988). O Decreto Nº 97.632/1989 exige Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) para empreendimentos de exploração mineral, visando à estabilidade ambiental (BRASIL, 1989).

A mineração, enquanto geradora de riscos severos e muitas vezes irreversíveis para o ecossistema e sociedade, é a única atividade com obrigações de Recuperação de Áreas Degradadas (RAD) conforme a Constituição Federal (FARIAS, 2016).

Atualmente, o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) desempenha um papel crucial na restauração de locais degradados, visando reabilitá-los ao seu estado de equilíbrio anterior. Conforme estabelecido na Lei Federal 7.347/1985, o PRAD é um instrumento fundamental para a restauração ambiental (BRASIL, 1985). A escolha das técnicas e a abordagem para a recuperação dependem diretamente do tipo de impacto que ocorreu na área de mineração e de sua magnitude (MELO, 2020).

A mineração abrange vastas extensões, desequilibrando biomas e ecossistemas (ROSA; SHIMBO; AZEVEDO, 2019). E suas consequências incluem supressão vegetal, degradação do solo e erosão, causada pela extração mineral, resultando em alterações na paisagem e expondo o solo à lixiviação e contaminantes (SILVA et al., 2020).

A recuperação de áreas pós-mineração é um processo crucial para mitigar os impactos ambientais causados pela atividade mineradora. Essa prática envolve a restauração do solo, da vegetação e dos recursos hídricos que foram afetados pela mineração, visando restabelecer o equilíbrio ecossistêmico e promover a biodiversidade (RÖDEL, 2021).

### **3.3. Tipos de impactos na área de mineração de Ipixuna do Pará:**

Os impactos ambientais causados por empreendimentos de grande porte têm se tornado comuns no Brasil, afetando setores como usinas hidrelétricas, mineração e agricultura. Essas atividades muitas vezes resultam na inundação de grandes áreas de florestas tropicais de valor ecológico significativo, causando perdas de biodiversidade e afetando comunidades locais.

Além disso, a mineração pode provocar alterações nos fluxos de sedimentos dos rios, afetando negativamente a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos (MORENO et al., 2018). Esses impactos ressaltam a importância de um planejamento e monitoramento ambiental cuidadoso para mitigar danos irreversíveis à natureza e às comunidades afetadas.

Em Ipixuna do Pará, os impactos derivados da extração mineral constituem um desafio complexo e multifacetado. A contaminação dos recursos hídricos não apenas prejudica a qualidade da água, mas também afeta as atividades locais, como a agricultura e a

pesca, tendo um impacto direto nas fontes de subsistência das comunidades (CARVALHO, 2009).

Certamente, a degradação do solo e do relevo, como apontado por Villela (2018), pode ter ramificações ainda mais profundas em Ipixuna do Pará. A erosão do solo não apenas diminui sua fertilidade, mas também prejudica a capacidade da região de se recuperar após o encerramento das operações de mineração. Isso pode resultar na deterioração de paisagens anteriormente deslumbrantes, tornando-as inúteis e, como consequência, afetando negativamente a qualidade de vida das comunidades locais, ao mesmo tempo em que limita suas perspectivas econômicas.

Além disso, os deslizamentos de terra representam um risco constante para a segurança das pessoas e da infraestrutura, exigindo investimentos contínuos em medidas de estabilização e contenção. Os danos à infraestrutura local, como estradas e pontes, não apenas aumentam os custos de reparo, mas também podem interromper o acesso a serviços essenciais, como educação e saúde, prejudicando ainda mais a qualidade de vida das comunidades. Portanto, a degradação do solo e do relevo, causada pela mineração, em Ipixuna do Pará, não apenas tem implicações imediatas, mas também afeta a sustentabilidade, a longo prazo, na região, enfatizando a importância de práticas de mineração responsáveis e medidas de mitigação eficazes (ROCHA, 2013).

Esses impactos socioeconômicos, muitas vezes, se traduzem em desafios de saúde pública, uma vez que a exposição a água contaminada e a partículas minerais pode afetar a saúde das pessoas, resultando em problemas respiratórios e doenças relacionadas à ingestão de água contaminada. Portanto, a gestão responsável da atividade de mineração em Ipixuna do Pará é essencial para minimizar os impactos adversos e proteger tanto o meio ambiente quanto o bem-estar das comunidades locais.

A atividade mineradora exerce uma influência substancial na poluição da água em virtude da liberação de poluentes em corpos hídricos. Conforme destacado por Branco (2021), esses poluentes podem incluir substâncias químicas tóxicas como metais pesados, ácidos e sedimentos em suspensão. A poluição resultante pode não apenas contaminar as águas superficiais, prejudicando a fauna aquática e afetando a qualidade da água para consumo humano, mas também pode infiltrar nos lençóis freáticos, comprometendo ainda mais os recursos hídricos subterrâneos (DE MATOS, 2020).

Os efeitos dessa poluição se estendem para além das áreas de mineração, afetando ecossistemas aquáticos, comunidades ribeirinhas e ecossistemas marinhos, em regiões próximas a cursos d'água contaminados. Portanto, a gestão adequada dos resíduos da mineração e a implementação de medidas de controle ambiental, como o uso de tecnologias para o monitoramento florestal, são cruciais para mitigar os impactos negativos da atividade mineradora na qualidade da água e na biodiversidade aquática (SILVA,2022).

### **3.4. Uso do sensoriamento remoto para análise de degradação vegetal natural**

Sensoriamento remoto, conforme Lillesand e Kiefer (1987), envolve a obtenção de informações sobre objetos ou fenômenos sem contato direto. Imagens de satélite, radares e aerofotografias são produtos desse método. O sensoriamento remoto desempenha um papel fundamental no geoprocessamento ambiental (CARDOZO, 2018). É usado para análises de áreas erodidas, perda de cobertura vegetal, fragilidade ambiental e outros (BATISTA, 2015; RIBEIRO et al., 2017).

O monitoramento florestal pode ser feito por meio de índices de vegetação, que destacam a vegetação em um local e permite comparações temporais e espaciais (HUETE et al., 2002). Imagens são obtidas por sensores em satélites e aeronaves (STEVIC et al., 2016). Métodos como o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado (MSAVI) usam reflectância de satélite para estimar a cobertura vegetal. Esses índices permitem detectar alterações e contribuem para o manejo sustentável de ecossistemas terrestres (QI et al., 1994).

Tanto o SAVI quanto o MSAVI são utilizados no campo do sensoriamento remoto e análise de imagens de satélite com o objetivo de avaliar a saúde e densidade da vegetação em uma área específica (PONZONI, SHIMABUKURO e KUPLICH, 2012). Eles se mostram especialmente úteis em situações em que a cobertura vegetal é variável, o solo está visível ou há uma distribuição heterogênea da vegetação. Ambos são derivados do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), um indicador calculado a partir das discrepâncias nas reflexões das faixas de luz visível e infravermelho próximo no espectro eletromagnético (KONDA et al, 2018).

O SAVI foi desenvolvido com a intenção de abordar certos problemas que podem surgir ao se utilizar o NDVI, particularmente, em áreas onde o solo fica exposto ou a

cobertura vegetal é escassa. Nas situações em que o solo é visível entre as plantas, o NDVI pode gerar resultados menos confiáveis e o SAVI aborda esse problema ao incorporar uma correção relacionada ao solo, tornando-o mais apropriado para áreas que apresentam variações, tanto na cobertura vegetal, quanto no solo exposto (HUETE, 1988). A fórmula utilizada para o cálculo do SAVI é a seguinte:

$$SAVI = \frac{(NIR+RED+L)}{(1+L)(NIR-RED)}$$

Onde:

- **NIR** é a reflectância no infravermelho próximo.
- **RED** é a reflectância no espectro vermelho.
- **L** é um fator de correção do solo, geralmente definido como 0,5. Esse fator controla a magnitude do ajuste para o solo exposto.

O MSAVI é uma adaptação suplementar do SAVI que busca aprimorar o cálculo, especialmente em cenários com grande densidade de vegetação. Em locais onde a vegetação é extremamente densa, o SAVI pode tender a superestimar a quantidade de cobertura vegetal. O MSAVI procura solucionar esse desafio ajustando o parâmetro L, o qual desempenha um papel crítico na fórmula. Essa adaptação é particularmente útil em ambientes com vegetação densa, como florestas exuberantes ou plantações fechadas. A fórmula para o cálculo do MSAVI é semelhante à do SAVI:

$$MSAVI = \frac{2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - RED)}}{2}$$

A principal distinção entre o MSAVI e o SAVI é a maneira como a diferença entre *NIR* e *RED* é tratada. No MSAVI, essa diferença é usada na raiz quadrada para ajustar a sensibilidade do índice em situações de alta densidade de vegetação. A adição dessa raiz quadrada visa atenuar o efeito de saturação que pode ocorrer quando a vegetação é muito densa e o índice tradicional não consegue diferenciar adequadamente a vegetação exuberante.

Ambos SAVI e MSAVI são utilizados para avaliar a densidade da vegetação em áreas que possam apresentar desafios para o cálculo do NDVI tradicional. Eles são particularmente úteis em ambientes agrícolas, florestais e outros tipos de cobertura vegetal heterogênea (PINTO *et al.*, 2017)

## 4. MATERIAS E MÉTODOS

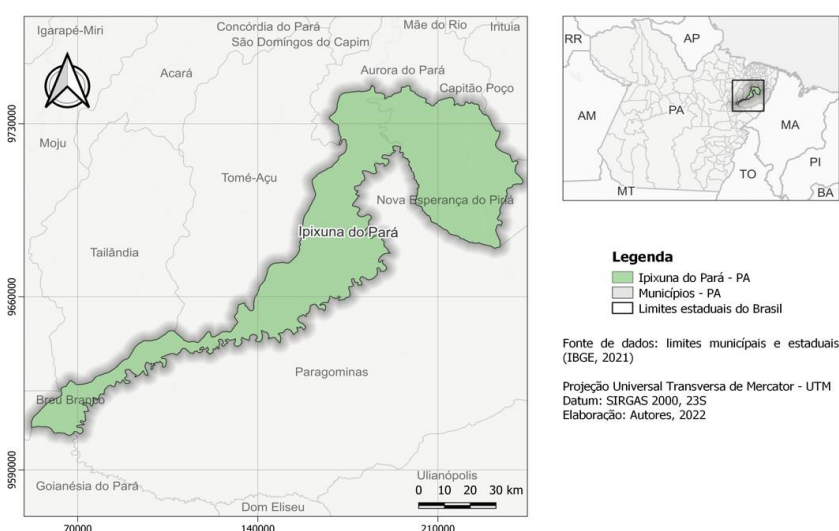
### 4.1 Seleção do Local de Estudo

O estudo teve como cenário o município de Ipixuna do Pará, situado na Mesorregião do Nordeste paraense, no estado do Pará. Com uma população estimada de 67.170 habitantes e abrangendo cerca de 5,215 km<sup>2</sup> (IBGE, 2021), suas coordenadas geográficas são S 2° 33' 31" e W 47° 29' 45".

Ipixuna do Pará está situada em um dos estados com maior concentração de empresas mineradoras no Brasil, notadamente no que diz respeito à extração de minérios de ferro, bauxita e níquel. A economia desta região é predominantemente voltada para atividades agrícolas, pecuárias, extrativismo vegetal, comércio e serviços diversos. No entanto, quando se trata especificamente de atividades mineradoras, o município não se destaca de maneira significativa, apresentando apenas iniciativas de pequena e média escala (DOS SANTOS CAITANO, 2022).

A região possui um clima predominante classificado como tropical, de acordo com Köppen. A temperatura média anual é de aproximadamente 26,7°C, acompanhada por uma pluviosidade média anual de 2098 mm. As médias de temperatura podem variar ao longo do ano, oscilando entre 0,8°C e 27,1°C. O mês mais quente é outubro, enquanto fevereiro apresenta uma média de temperatura em torno de 26,3°C (IBGE, 2021).

Figura 1- Mapa de localização do município de Ipixuna do Pará - PA



Fonte: Autores (2022)

## 4.2 Aquisição dos dados espaciais e seleção de imagens

A obtenção do arquivo *shapefile* do município foi o primeiro passo para localizar as áreas de exploração mineral. Em sequência, foram escolhidas imagens *Landsat* dos anos 2017, 2020 e 2022 para a região em questão.

As imagens do satélite *Landsat* foram adquiridas por meio do site *Earth Explorer*, operado pelo *United States Geological Survey* (USGS), o qual oferece acesso e download de dados de sensoriamento remoto. Utilizou-se o tipo de imagem *Landsat Collection 2 Level 2*, que incorpora algoritmos e técnicas avançadas para correção radiométrica e atmosférica, resultando em imagens de melhor qualidade, precisão e reduzindo os efeitos atmosféricos. Essas imagens da *Collection 2* passaram por uma calibração rigorosa e um refinamento no processo de georreferenciamento, o que melhorou significativamente a precisão e o alinhamento dos dados espaciais com a superfície da Terra (DANDOIS; ELLIS, 2010)

A partir do conjunto de dados *Landsat Collection 2 Level 2* e do *shapefile* da área do município de Ipixuna do Pará, foi definido o critério de cobertura de nuvens menor que 10% na região para os anos de 2017, 2020 e 2022.

Com base nesse critério, foram selecionadas as seguintes imagens com as respectivas datas (Quadro 1):

Quadro 1 - Dados das imagens *Landsat*

<b>Imagem ID</b>	<b>Data</b>	<b>Cobertura de nuvens</b>
LC08_L2SP_223062_20170706_20200903_02_T1	06/07/2017	1,43%
LC08_L2SP_223062_20200916_20201005_02_T1	16/09/2020	6,63%
LC08_L2SP_223062_20220720_20220726_02_T1	20/07/2022	0,28%

Fonte: Autores (2023)

As informações apresentadas no Quadro 1 referem-se aos dados das imagens do satélite *Landsat* para a região em questão. Foram identificadas três imagens com suas respectivas datas de aquisição e porcentagens de cobertura de nuvens. A imagem adquirida em 06 de julho de 2017 apresentou uma baixa cobertura de nuvens, representando apenas

1,43% da área da imagem. A segunda imagem, datada de 16 de setembro de 2020, mostrou uma cobertura de nuvens um pouco mais significativa, atingindo 6,63%. Já a imagem mais recente, capturada em 20 de julho de 2022, registrou uma cobertura de nuvens bastante reduzida, representando apenas 0,28% da área total da imagem. Esses dados são fundamentais para a seleção das imagens mais adequadas para análise, levando em consideração a necessidade de minimizar a interferência causada pelas nuvens nas observações e estudos realizados na região.

Nessa época de obtenção das imagens o clima predominante era seco, com pouca incidência de chuvas, já que o Município de Ipixuna do Pará possui dois períodos climáticos: Chuvoso, compreendido entre os meses de janeiro a maio e Seco, compreendido entre os meses de junho e dezembro (TEIXEIRA, 2020).

#### **4.4 Obtenção de Índices de Vegetação Processados:**

Para adquirir os índices de vegetação, incluindo SAVI e MSAVI, foi empregada a interface *On-Demand* do EROS *Science Processing Architecture* (ESPA) do USGS. A lista de Identificação da imagem (IDs) das imagens selecionadas foi enviada para a USGS através da interface *On-Demand* do EROS *Science Processing Architecture*, solicitando o processamento dos índices de vegetação desejados. Posteriormente, os resultados processados foram disponibilizados para *download*.

#### **4.5 Download dos Produtos Processados e Processamento das Imagens**

Após o processamento no ESPA, links para download dos índices de vegetação foram fornecidos. Em outras palavras, o ESPA processou dados ou informações relacionadas à vegetação, e como resultado desse processamento, foram criados links que permitem que os usuários acessem e baixem os índices de vegetação gerados durante essa etapa de processamento. Esses índices de vegetação podem conter informações valiosas sobre a saúde e as condições das áreas vegetadas, e os links são fornecidos para que as pessoas interessadas possam acessar essas informações ou utilizá-las em suas análises ou estudos. Para o processamento das imagens e dos índices SAVI e MSAVI, utilizou-se o software QGIS 3.30. As etapas de processamento compreenderam o recorte da área do município, a atribuição do Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) SIRGAS 2000, a definição de rampas de cores para visualização e, por fim, a criação e exportação dos mapas resultantes.

Para efeito de comparação com os índices SAVI e MSAVI obtidos, procedeu-se com a geração de uma composição colorida RGB, para uma representação visual colorida da área de estudo, utilizando as bandas espectrais 762 das imagens *Landsat* selecionadas. Os *layouts* finais foram criados utilizando o *software* QGIS 3.30. Nesse programa, procedeu-se ao recorte da área de estudo nas imagens previamente processadas. Em seguida, mapas temáticos para cada índice de vegetação foram gerados, aplicando critérios de classificação consistentes, incluindo número de categorias, método de classificação e paleta de cores.

#### **4.6 Processo de análise dos índices obtidos**

A avaliação dos índices vegetativos empregou a análise visual dos anos em que se manifestou a degradação na região em questão. Embora seja perceptível a evolução ao longo dos anos, torna-se imprescindível a obtenção de dados estatísticos que respaldam as transformações que se verificaram tanto na área 1 quanto na área 2, ( Figura 2) e (Figura 5) ambas objeto de estudo.

Nesse contexto, é crucial reconhecer que, embora não haja dados estatísticos como principal ferramenta analítica neste estudo da área, a avaliação visual revelou-se igualmente indispensável para a apreensão dos resultados concernentes às transformações ocorridas no local. A observação cuidadosa e sistemática das variações da composição vegetativa ao longo dos anos permitiu identificar tendências, padrões e correlações notáveis. Esta abordagem, ancorada na perspicácia visual e na compreensão das imagens obtidas, serviu como um complemento valioso à pesquisa, ampliando significativamente a profundidade da análise.

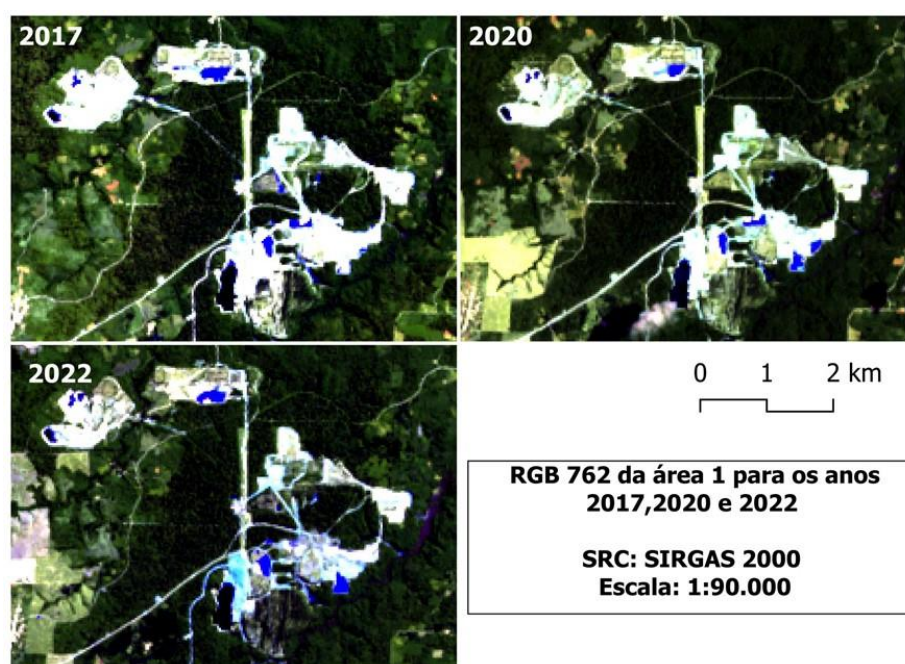
E, por fim, é importante ressaltar que, em algumas regiões analisadas nos índices SAVI e MSAVI, os valores  $<0$  não representam solo exposto, como se poderia esperar, mas, na verdade, correspondem a áreas de piscinas de rejeitos resultantes das operações de extração mineral.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As áreas 1 e 2, selecionadas dentro do município de Ipixuna do Pará, representam áreas que ocorrem projetos de exploração mineral relacionados com objeto desta pesquisa. Para melhor visualização das características biofísicas das áreas, foram geradas composições coloridas RGB 762 das imagens Landsat 8 com 30 m de resolução para os anos de 2017, 2020 e 2022. Essa composição pode ser utilizada como referência para comparar com os índices SAVI e MSAVI gerados.

### Área 1:

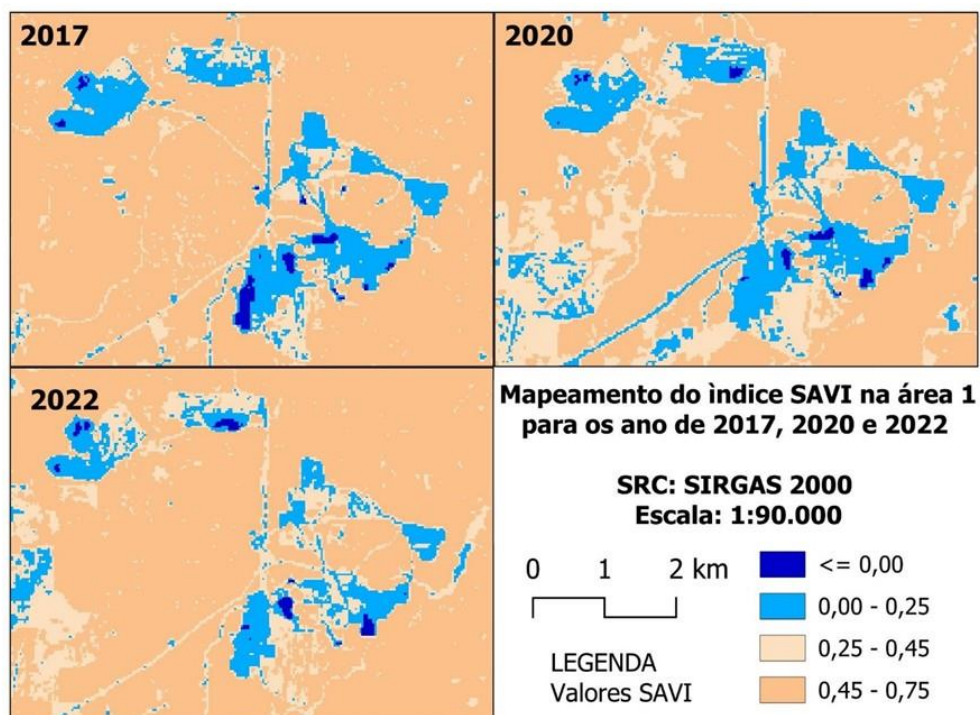
Figura 2 - Mapeamento da área 1 nos anos 2017, 2020 e 2022 utilizando RGB 762



Fonte: Autores (2023)

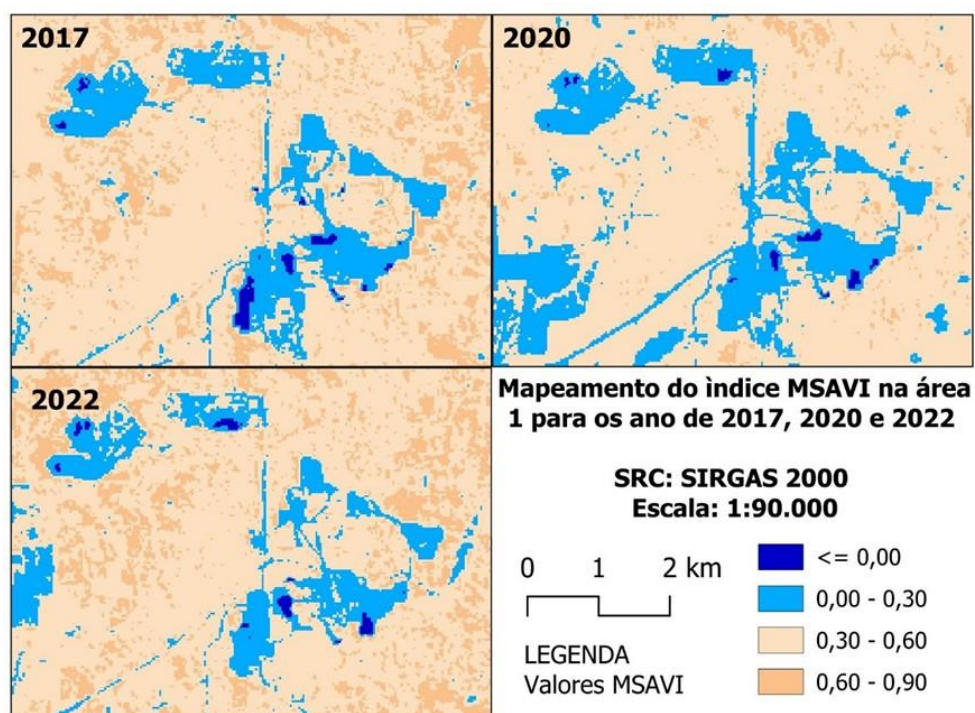
As imagens coloridas, na composição RGB 762 (Figuras 2), compara a evolução da exploração mineral e de sua conseqüente recomposição nos três anos analisados, o que facilitou a identificação dessas áreas e serviu como referência para analisar os resultados obtidos, nos índices de vegetação SAVI e MSAVI, nas Figuras 3 e Figura 4.

Figura 3 – Aplicação do índice SAVI na área 1 nos anos 2017, 2020 e 2022



Fonte: Autores (2023)

Figura 4 – Aplicação do índice MSAVI na área 1 nos anos 2017, 2020 e 2022



Fonte: Autores (2023)

Na pesquisa que investigou o uso dos índices de vegetação SAVI e MSAVI, uma análise visual foi conduzida para entender como esses índices variam em diferentes faixas de valores. A análise visual desempenha um papel fundamental em trabalhos envolvendo mapas contendo índices de vegetação SAVI e MSAVI, pois permite a interpretação direta e a compreensão intuitiva das condições da vegetação em uma área (CHEN *et al.*, 2020)

Segundo Pires (1993), enquanto os índices de vegetação fornecem informações quantitativas valiosas sobre a saúde e densidade da vegetação com base em dados espectrais, a análise visual permite a identificação de padrões espaciais e tendências que podem não ser evidentes apenas através de números. Através da análise visual, é possível identificar áreas de vegetação exuberante, detectar tendências de mudança, ao longo do tempo, e até mesmo, destacar áreas de estresse vegetativo, tudo de forma imediata e acessível. Além disso, a análise visual pode auxiliar na tomada de decisões, como identificar áreas que requerem intervenção ou monitoramento mais detalhado, tornando-se uma ferramenta essencial para a interpretação completa e eficaz de mapas de índices de vegetação SAVI e MSAVI, em estudos ambientais, agronômicos e de recursos naturais.

Segundo Fadaei (2020), os resultados obtidos ao aplicar os índices de vegetação SAVI e MSAVI, em um determinado mapa, oferecem informações sobre a distribuição e a densidade da vegetação na área de estudo. A análise das diferentes faixas de valores para cada índice proporciona uma compreensão aprofundada das condições da vegetação e da exposição do solo.

A área 1 (Figura 1) merece destaque na faixa que engloba valores menores que 0 nos índices SAVI. Embora essa faixa esteja menos presente no mapa, sua importância é significativa, pois sinaliza a ocorrência de valores do SAVI abaixo do limite zero. Para Fabijanczyk e Zawadzki (2022), isso pode sugerir a presença de solo degradado ou condições ambientais desfavoráveis ao crescimento vegetal, o que, nesse contexto, pode estar relacionado às lagoas de rejeitos.

À medida que analisamos a transição entre as faixas de valores do SAVI <0, 0,00-0,25, 0,25-0,45 e 0,45-0,75 - emerge uma tendência clara de melhoria na saúde e densidade da vegetação. Na faixa inicial de 0,00-0,25, encontramos os valores mais baixos de SAVI, sugerindo a possibilidade de áreas com solo exposto ou vegetação esparsa. É relevante notar que essa mesma faixa inclui a localização da empresa e a estrada que leva ao local de estudo,

indicando uma associação entre essa faixa e a presença de infraestrutura, bem como sendo a área principal de atividade mineradora.

Por outro lado, nas faixas de 0,25-0,45 e 0,45-0,75, observamos uma vegetação mais densa nas proximidades do local de estudo, especialmente em torno da empresa mineradora. Essas faixas refletem uma melhoria na qualidade e densidade da vegetação, sinalizando um ambiente mais saudável. É plausível sugerir que a atividade da empresa pode estar exercendo influência nas características da vegetação na região, o que resulta nesses padrões distintos nas faixas de valores do SAVI. É importante destacar a predominância da vegetação densa na faixa de valores 0,45-0,75, conforme ilustrado no mapa. Essa observação ressalta a influência potencial das atividades da empresa na vegetação circundante e enfatiza a importância de uma análise mais aprofundada para compreender completamente os impactos ambientais.

Também é notável que no ano de 2020 há uma significativa predominância dos índices na faixa de 0,25-0,45, em contraste com o ano de 2017, quando a área exibia características distintas, com uma presença mais pronunciada de floresta densa, refletida em índices mais elevados, situados entre 0,45-0,75. Embora o ano de 2020 revele áreas com densidade leve de vegetação, o ano de 2022 apresenta uma configuração distinta, evidenciando locais onde ocorre um aumento notável de floresta densa, associado aos índices na faixa de 0,45-0,75.

De acordo com Monteiro (2001), o SAVI tende a atingir seu ponto máximo durante o verão em muitas áreas onde é aplicado, período em que as temperaturas são elevadas e há alta incidência de radiação solar, associada a um aumento nas chuvas. Neste contexto, este estudo optou por utilizar imagens capturadas durante os meses de verão na área de estudo, visando garantir a melhor qualidade das imagens.

A área 1 (Figura 1), realizamos o cálculo do índice MSAVI em quatro intervalos distintos: <0, 0,00 - 0,30, 0,30 - 0,60 e 0,60 - 0,90. Ao analisar esses intervalos, observamos padrões notáveis na distribuição dos valores do índice MSAVI, os quais sugerem características específicas da vegetação. Destaca-se, em particular, a faixa intermediária de 0,30 - 0,60, que se distingue pelo consistente aumento nos valores do índice MSAVI em comparação com a faixa mais baixa de 0,00 - 0,30. Essa transição indica que, dentro desse intervalo específico, a vegetação está experimentando um crescimento saudável e otimizado. De acordo com Kundu (2016), esse padrão pode ser interpretado como um indício de

vegetação levemente densa, onde as condições ambientais parecem ser favoráveis ao desenvolvimento das plantas.

A análise visual do intervalo mais alto (0,60 - 0,90) revela áreas com vegetação densa e exuberante. Esses valores indicam regiões com cobertura vegetal ampla e densa, possivelmente correspondendo a ecossistemas naturais ou preservados. A relação entre esses intervalos do índice MSAVI nos fornece uma visão completa das condições da vegetação na "Área 1". Conforme observado por Kim (2017), a progressão desses valores reflete a evolução da saúde e densidade da vegetação, oferecendo informações valiosas sobre os padrões de crescimento na região. Essa análise destaca a utilidade do índice MSAVI como uma ferramenta sensível para caracterizar a vegetação em diferentes estágios de desenvolvimento e cobertura.

A comparação entre os dois índices revela diferenças intrigantes. Enquanto o SAVI aponta para áreas com índices predominantemente na faixa de 0,45-0,75, indicando uma vegetação densa e exuberante, o MSAVI destaca áreas com uma maior concentração de índices na faixa de 0,30-0,60. Isso sugere uma vegetação levemente densa, mas não tão exuberante quanto a representada no mapa do SAVI. Em resumo, o SAVI destaca áreas com florestas densas, enquanto o MSAVI mostra uma vegetação com densidade moderada. Essas discrepâncias podem ser explicadas por diferentes sensibilidades dos índices às características da vegetação e às condições ambientais.

Além disso, é relevante ressaltar como o MSAVI proporciona uma representação mais minuciosa no mapa. Um exemplo significativo disso pode ser observado ao analisar o ano de 2017, quando o MSAVI indica uma maior extensão de índices na faixa de 0,00-0,30. Essa indicação aponta para uma área com solo exposto, enquanto o mapa SAVI sugere uma exposição de solo mais gradual e suavizada. Esse contraste enfatiza a habilidade do MSAVI em capturar nuances e características mais sutis do terreno.

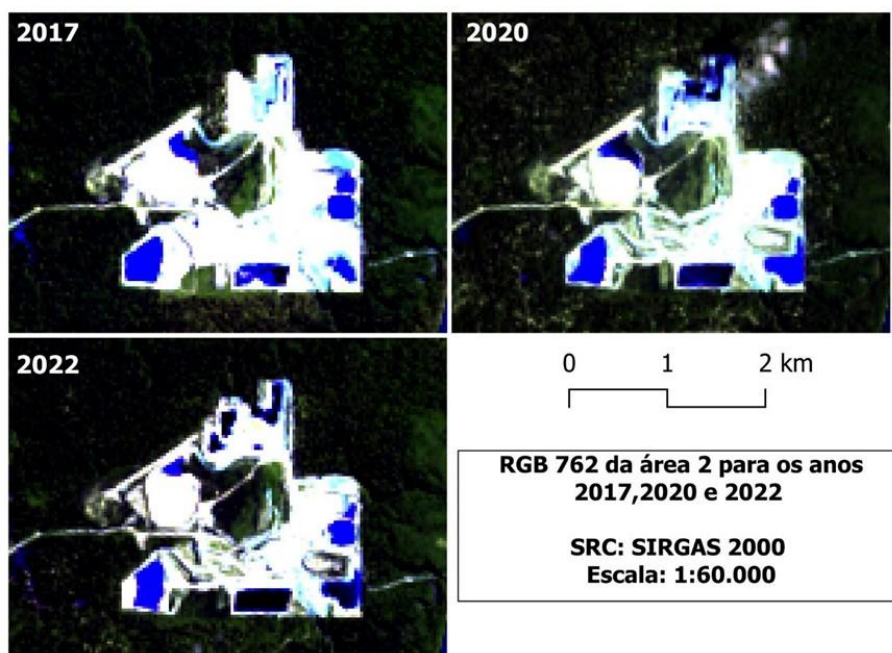
Em um estudo separado, Qi et al. (1994) testaram o MSAVI, uma técnica aprimorada do SAVI, em imagens de satélite para análise da vegetação. No trabalho eles informam que o MSAVI reduziu o "ruído" do solo nas imagens, resultando em uma análise mais precisa. Em áreas de alta cobertura vegetal, o MSAVI apresentou um bom desempenho. Contudo, os pesquisadores concluíram que são necessárias mais pesquisas para compreender plenamente a aplicabilidade do MSAVI em diferentes contextos. Em resumo, a técnica mostrou potencial

para aprimorar o monitoramento da vegetação e do meio ambiente por meio de imagens de satélite.

Apesar de os índices apresentarem diferenças nos valores de vegetação devido à variação nos algoritmos utilizados, a distinção visual entre eles é sutil, como evidenciado nas Figuras 3 e 4. A principal diferença entre eles reside no fato de que o índice MSAVI inclui um fator de ajuste para o brilho do solo, alterando a escala de valores associada a cada índice, embora ambos utilizem as mesmas bandas no algoritmo.

## Área 2:

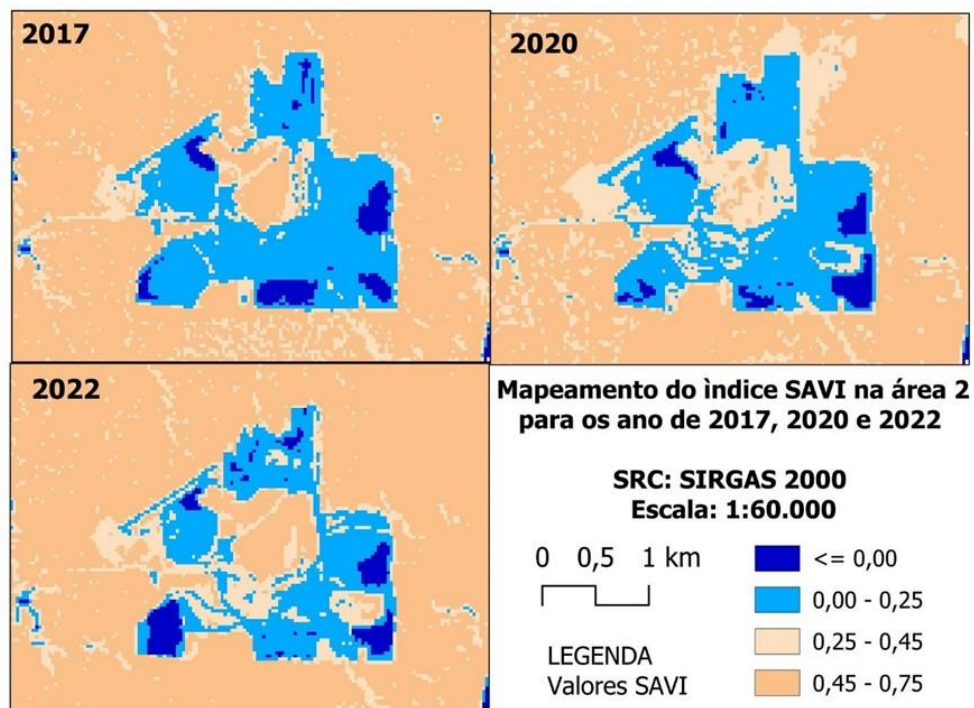
Figura 5 – Mapeamento da área 2 nos anos 2017, 2020 e 2022 utilizando RGB 762



Fonte: Autores (2023)

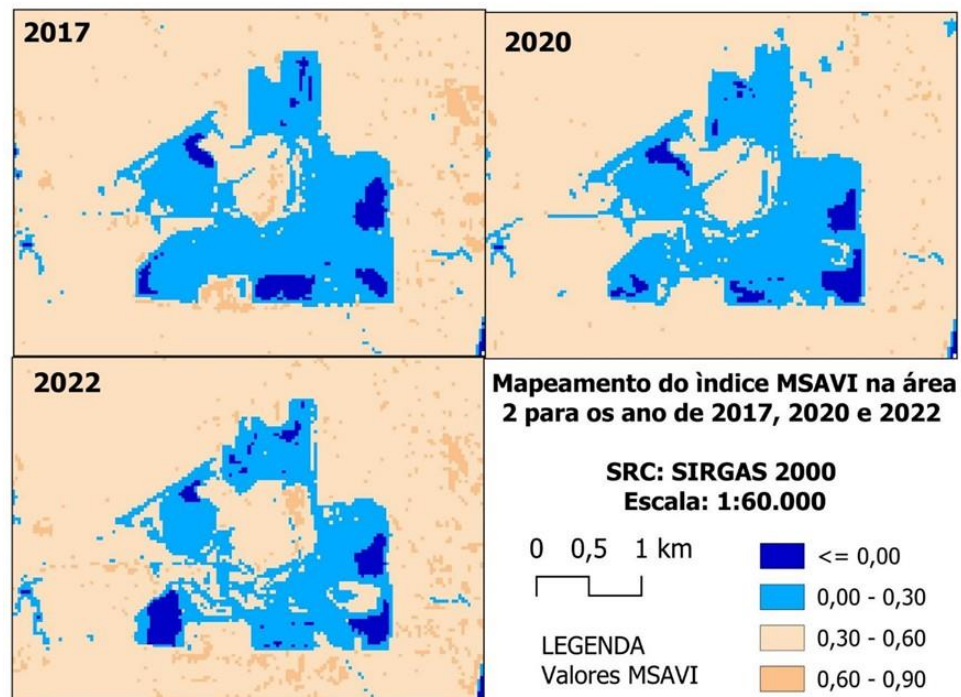
Na figura 5 apresenta-se uma outra área selecionada (área 2) onde se localiza um projeto de exploração mineral. Percebe-se através da composição colorida RGB 762, que o projeto se encontra cercado de vegetação e, dentro da área do projeto de mineração, são evidenciados as áreas de solo expostos e as lagoas de rejeito, evoluindo ano a ano, sendo que no ano de 2017 a área considerada degradada estava maior e em 2022 parecia ter sido reduzida através da recomposição vegetal.

Figura 6 – Aplicação do índice SAVI na área 2 nos anos 2017, 2020 e 2022



Fonte: Autores (2023)

Figura 7 – Aplicação do índice MSAVI na área 2 nos anos 2017, 2020 e 2022



Fonte: Autores (2023)

Os índices de vegetação SAVI e MSAVI geram valores que indicam a densidade da vegetação nas áreas de estudo. Esses valores se aproximam de +1 quando a vegetação é mais densa, representada em mapas temáticos na tonalidade bege escuro. Por outro lado, valores próximos de zero indicam baixa densidade vegetal e são representados nos mapas na tonalidade bege claro. Valores negativos são atribuídos a áreas construídas, solo exposto e corpos d'água, que aparecem em azul claro nos mapas.

A maior diferença entre os índices foi observada na classe correspondente a valores próximos de zero ou menores, representando áreas com alto nível de degradação. Essas áreas se tornaram piscinas de rejeitos ao longo dos meses, devido à falta de manutenção após a extração mineral, e são representadas nos mapas na tonalidade azul forte.

Através da análise visual das imagens capturadas nos anos de 2017, 2020 e 2022, é evidente o notável avanço no crescimento vegetativo tanto na área 1 quanto na área 2. Durante esse período de observação, pode-se claramente perceber um aumento significativo na densidade da vegetação em ambas as regiões. As imagens revelam uma transformação significativa, com a vegetação se tornando mais exuberante e densa ao longo do tempo. Essa evolução é um indicativo importante das mudanças nas condições ambientais, influenciadas não apenas pelas variáveis climáticas, ao longo desses anos, mas também por projetos sociais implementados pela empresa, que foi objeto de estudo em colaboração com os moradores da região. Isso realça a relevância da análise visual como uma ferramenta valiosa para acompanhar o crescimento vegetativo e as tendências ambientais em ambientes diversos, onde fatores humanos e naturais interagem de maneira significativa.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia empregada possibilitou a comparação dos índices de vegetação SAVI e MSAVI em sistemas de informação geográfica. A análise dos resultados revelou que os valores desses dois índices foram bastante semelhantes, embora houvesse variações nos valores entre as classes definidas.

Os índices de vegetação SAVI e MSAVI apresentaram um desempenho positivo na representação da vegetação na área de estudo, refletindo adequadamente sua distribuição e densidade. As diferenças observadas nos valores mínimos e máximos de cada índice tiveram impacto limitado na representação gráfica dos mapas temáticos.

A comparação das imagens de 2017 e 2022 revelou uma notável diminuição no nível de degradação grave na área estudada. Isso sugere uma melhoria considerável na condição ambiental da região ao longo desses cinco anos, apontando para uma possível recuperação ou atenuação do dano ambiental previamente observado.

Ao longo do tempo, os índices de vegetação têm se consolidado como indicadores fundamentais da qualidade ambiental, particularmente na Amazônia. Nessa região, observa-se um aumento substancial das atividades de mineração, impulsionado pelo desenvolvimento humano. Contudo, esse crescimento nas atividades mineradoras têm impactado negativamente a saúde desse ecossistema tropical, contribuindo significativamente para sua degradação.

Os resultados obtidos neste estudo destacam a confiabilidade tanto do SAVI quanto do MSAVI como indicadores do estado vegetativo em áreas com atividade mineral. Esses índices demonstraram resultados consistentes com a realidade observada, provando-se úteis para avaliações ambientais acuradas e diagnósticos precisos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, R. S. **Técnicas de restauração florestal em áreas mineradas e definição de espécies chaves para a Amazônia Oriental**. 2021. Tese de Doutorado. UFRA/Campus Belém.
- BATISTA, C. **Avaliação do cálculo de erosividade em escala regional com o auxílio de geoprocessamento na Serra de Baturité/CE**. Revista de Geociências do Nordeste, v.1, n.1, p.22-36, 2015.
- BEMERGUY, Amélia; GUEDES, Luana Bagarrão; PIMENTEL, Márcia Aparecida da Silva. **Estudos Amazônicos: História e Geografia – Vol. 1 (Amazônia contemporânea)**. Belém: Estudos Amazônicos, 2020.
- BEUCHLE, R.; ACHARD, F.; BOURGOIN, C. **Deflorestação e degradação florestal na Amazônia**. 2022.
- BRANCO, P. M. **Coisas que você deve saber sobre a água**. Brasil, CPRM. Serviço Geológico do Brasil, 2021. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Canal-Escola/Coisas-que-VoceDeve-Saber-sobre-a-Agua-1084.html> Acesso em: 22 jun. 2022.
- BRASIL. [Constituição (1985)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1985**. 1985.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.
- BRASIL. **Decreto 97.632, de 10 de abril de 1989**. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências, 1989.
- BRASIL. **Lei nº 6.938/81**. SISNAMA: Sistema Nacional do Meio Ambiente. 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências, lei Federal 6.938/81, 1981.
- CARDOZO, L. S. **O geoprocessamento no processo de tomada de decisão: relato sobre os estudos técnicos em meio ambiente do MPSC, TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina**. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Geografia, UFSC, Florianópolis. 2018.
- CARNEIRO, B. S; ANGELICA, R. S; SCHELLER, T; CASTRO E. A. S; NEVES, R. F. **Caracterização mineralógica e geoquímica e estudo das transformações de fase do caulim duro da região do Rio Capim, Pará**. Cerâmica, v. 49, p. 237–244, 2003.
- CARVALHO, S. S. de. **A importância da definição das áreas de influência (AI's) no licenciamento ambiental para a sociedade – estudo de caso: as minas de caulim no município de Ipixuna do Pará – PA**. 2009. Disponível em: Acesso em 30 out de 2022.
- CHEN, R.; YIN, G.; LIU, G.; LI, J.; VERGER, A. **Evaluation and Normalization of Topographic Effects on Vegetation Indices**. Remote Sensing, 12(14), 2290. 2020.

COSTA, G. M. da. **Estoque de carbono e macrofauna de invertebrados do solo construído após a mineração de bauxita.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém. 2022. Disponível em: <[bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/2372](http://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/2372)>. Acesso em 30 out de 2022.

DANDOIS, J. P.; ELLIS, E. C. **Remote sensing of vegetation structure using computer vision.** *Remote Sensing*, v. 2, n. 4, p. 1157-1176, 2010.

DE MATOS, Antônio Teixeira. **Poluição ambiental: impactos no meio físico.** Editora UFV, 2020.

DE OLIVEIRA, Zenon Sabino; FONTGALLAND, Isabel Lausanne. Recuperação de áreas degradadas no Seridó Potiguar: o caso do extrativismo mineral do município da Cidade de Equador/RN/Recovery of degraded areas in the Potiguar Seridó: the case of mineral extraction in the municipality of Equador/RN. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 4, p. 29965-29978, 2022.

DOS SANTOS CAITANO, Thamires Beatriz; MORALES, Gundisalvo Piratoba. POTENCIAL DOS ROYALTIES MINERAIS NA PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO DE MUNICÍPIOS DO ESTADO DO PARÁ, BRASIL. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 18, n. 3, 2022.

DUARTE, T. E. P.; ANGEOLLETO, F. H. S.; SANTOS, J. W. M.; LEANDRO, D. S.; BOHRER, J. F. C.; VACCHIANO, M. C.; LEITE, L. B. **O papel da cobertura vegetal nos ambientes urbanos e sua influência na qualidade de vida nas cidades.** *Desenvolvimento em questão*, Ijuí, v. 40, p. 175-203, jan./mar., 2017.

FABIJANCZYK, P.; ZAWADZKI, J. **Spatial correlations of NDVI and MSAVI2 indices of green and forested areas of urban agglomeration, case study Warsaw, Poland.** *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 26:2352-9385, 2022.

FADAEI, H. **Advanced land observing satellite data to identify ground vegetation in a juniper forest, northeast Iran.** *J. For. Res.* 31:531-9. 2020.

FAPESPA - Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas. **Boletim Comércio Exterior Paraense, 2017.** Disponível em: <<http://www.fapespa.pa.gov.br/produto/boletins/9>>. Acesso em: 30 out. 2022.

FARIAS, T. **Obrigações de recuperar áreas degradadas por mineração têm contornos peculiares.** Consultor Jurídico, 2016 Disponível em: <<http://www.conjur.com.br/2016-set-10/ambiente-juridico-obrigacao-recuperar-areas-mineracao-contornos-peculiares>>. Acesso em: 30 out, 2022

GRISSOLIA, E. M.; CORREIA JÚNIOR, F. C.; SARDOU FILHO, R.; WOSNIAK, R.; SILVA, G. A.; CHIBA, B. F. F.; PEREIRA, L. F.; ALMEIDA, R. C. de; FERREIRA, M.;

GUARINO, E.S.G.; SOUSA, L. P.; MIURA, A. K.; GOMES, G. C.; CASTILHOS, T.; LUCAS, R. **As leguminosas na recuperação de áreas degradadas do bioma Pampa.** Pelotas: EMBRAPA, Clima Temperado, 2016.

HUETE, A. **A soil-adjusted vegetation index (SAVI)**. Remote Sensing of Environment, 25(3), 295-309, 1988.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. **Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. (Special Issue)**. Remote Sensing of Environment, v. 83, n.1-2, p. 195-213, 2002.

IBGE, 2021. **Cidades@**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/ipixuna-do-para.html>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

IMERY CAULIM. **Imerys no Pará**. 2019. Disponível em: <http://bit.ly/2H2MmJa>. Acesso em: 30 de out. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações sobre a economia mineral brasileira**. Brasília, 2021.

Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. **Relatório anual de atividades**. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://bit.ly/2ZpTFRw>>.

JUŘICOVÁ, A.; CHUMAN, T.; ŽÍŽALA, D. **Soil organic carbon content and stock change after half a century of intensive cultivation in a chernozem area**. CATENA, v. 211, p. 105950, abr. 2022.

KIM, H.W.; KIM, J.H.; LI, W.; YANG, P.; CAO, Y. **Exploring the impact of green space health on runoff reduction using NDVI**. UrbanFor. Urban Green. 28, 81–87, 2017.

KONDA, V. G. R. K.; CHEJARLA, V. R.; MANDLA, V. R.; VOLETI, V.; CHOKKAVARAPU, N. **Vegetation damage assessment due to Hudhud cyclone based on NDVI using Landsat-8 satellite imagery**. Arabian Journal of Geosciences, 11(2), 1–11, 2018.

KUNDU, A.; DWIVEDI, S.; DUTTA, D. **Monitoring the vegetation health over India during contrasting monsoon years using satellite remote sensing indices**. Arabian Journal of Geosciences, 9(2), 1–15, 2016.

LAAOUIDI, Y.; Bahmed, A.; NAYLO, A.; EL KHALIL, H.; OUVARD, S.; SCHWARTZ, C.; BOULARBAH, A. **Trace elements in soils and vegetables from market gardens of urban areas in Marrakech City**. Biological trace element research, v. 195, n. 1, p. 301-316, 2020.

LEMO, M. A. Q., PIMENTEL, M. A. S.; ROCHA, E. P. **Balsas de resíduos minerais y los impactos sociales y ambientales en Barcarena - Pa**. Caminhos de Geografia, 18, 64, 413-425. 2017.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons, Inc. Second Edition. New York. 1987.

MAPBIOMAS. **Área ocupada pela mineração no Brasil cresce mais de 6 vezes entre 1985 e 2022**. Disponível em:

<https://mapbiomas.org/area-ocupada-pela-mineracao-no-brasil-cresce-mais-de-6-vezes-entre-1985-e-2020> . Acesso em 08/09/2023.

MELETI, M. V.; FADEL, B.; SMITH, M. **Perspectiva sistêmica da sustentabilidade nas organizações sob a ótica da cultura organizacional e sua repercussão no desenvolvimento regional.** Revista Gestão & Conhecimento. 2012.

MELO, Carlos Eduardo Silva. **Avaliação das práticas de recuperação ambiental na mineração de bauxita no planalto de Poços de Caldas e proposta de aprimoramento.** 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MONTEIRO, M. A.; **Caracterização climática do Estado de Santa Catarina: Uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano.** GEOSUL, Florianópolis, v. 16, n. 31, p. 69-78, 2001.

MORENO, E S.; OLIVEIRA, J. C.; SHIMABUKUR, P. H. F.; CARVALHO, L. **Licenciamento ambiental de grandes empreendimentos: quais os limites para avaliação de impactos diretos e indiretos em saúde? Estudo de caso na Terra Indígena Wajãpi, Amapá.** Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciênc. hum., Belém, v. 13, n. 3, p. 519- 540, Dec. 2018.

PAULA, S. F.; CASTRO, P. T. A. Geomorfologia antropogênica em função da mineração de ouro no século XVIII: bases científicas e educativas na proposição de uma Trilha Geoturística Urbana na Sede no Município de Ouro Preto (MG). **Revista Brasileira de Ecoturismo**, São Paulo, v.8, n.4, 2015. p. 432-443.

PEREIRA, M. D. **Avaliação de impactos ambientais causados pela atividade Mineradora no município de Romaria-MG.** Universidade Federal de Uberlândia. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32307>. Acesso em 24 jun. 2022.

PINTO, D. G.; FONTANA, D. C.; BREMM, C.; SCHAPARINI, L. P. Índices de vegetação NDVI, EVI e SAVI como indicadores espectrais do crescimento de pastagem natural no bioma Pampa. Anais... XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR, Santos, SP, Brasil, 28 a 31 de maio de 2017, INPE p. 5241-5248.ISBN: 978-85-17-00088-1.

PIRES, P. S. **Avaliação da qualidade visual da paisagem na região carbonífera de Criciúma-SC.** Curitiba, 1993. Dissertação (mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 96 p.

PONZONI, F. J. SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação.** São José dos Campos, SP, Oficina de Textos, 2ª edição, 2012. 176 p.

QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A.R., KERR, Y.H., & SOROOSHIAN, S. (1994). **A modified soil adjusted vegetation index.** Remote Sensing of Environment, 48(2), 119-126.

RIBEIRO, R. J. F.; JÚNIOR, D. C. C. **Delimitação das Áreas de Preservação Permanente do Município de Eunápolis – BA Utilizando Geotecnologias**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, n.2, v.1, p.159-173, 2017.

ROCHA, Danusa Di Paula Nascimento da et al. As territorialidades das pequenas empresas de mineração no nordeste paraense: o caso do município de Capitão Poço (PA). 2013.

RÖDEL, J. T. Plano de recuperação de área degradada pela mineração de saibro: estudo de caso no município de Sentinela do Sul (RS). 2021.

ROSA, M.; SHIMBO, J. Z.; AZEVEDO, T. **MapBiomias - Mapeando as transformações do território brasileiro nas últimas três décadas**. p. 95-100, 2019. In: Desafios do processo frente à crise ambiental: VIII Simpósio de Restauração ecológica / Luiz Mauro Barbosa. São Paulo: Instituto de Botânica, 278p. 2019.

SANTOS, J.A.G. **Recuperação e reabilitação de áreas degradadas pela mineração**. Cruz das Almas, BA: UFRB, 44p, 2017.

SILVA, A. F. C.; COSTA, M. do S. S.; BOTELHO, M. G. L.; FURTADO, L. G.; BATISTA, V. de A.; CARNEIRO, C. R. de O.; MORALES, G. P. Impactos das alterações no uso e cobertura do solo no Município de Altamira, Pará. Research, Society and Development, v. 9, n. 8, 2020.

SILVA, G. D. P. D. **Contribuições de técnicas de reabilitação ambiental de ambientes degradados do domínio morfoclimático dos Mares de Morros em Santa Catarina**. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). 2020.

SILVA, Higo Henrique Cirilo Gomes da. **A química do solo e a origem da vida: numa abordagem prebiótica**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Brasil.

SILVA, Mauricio De Oliveira; DE CASTRO LEAL, Thomas Leonardo Marques; RODRIGUES, Luciano Brito. POR QUE CONSERVAR? DA CRIAÇÃO DAS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO AO USO DE TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO E FISCALIZAÇÃO. **REVISTA PSIPRO**, v. 1, n. 3, p. 89-110, 2022.

SILVA, R. D. DA; ARAÚJO, I.N.F.; CUNHA, G. K. G.; CUNHA, K. P.V. DA. **Técnicas de controle de erosão em áreas de mineração no semiárido**. Congresso Nacional da Diversidade do Semiárido. 2018. Disponível em: [www. conadis.com.br](http://www.conadis.com.br). Acesso em 30 out. 2022.

STEVIC, D.; HUT, I.; DOJČINOVIĆ, N.; JOKOVIĆ, J. **Automated identification of land cover type using multispectral satellite images**. *Energy and Buildings*, v. 115, p. 131-137, 2016.

TEIXEIRA, Patrick; MATTA, Milton. Detecção e análise da distribuição de focos de calor no município de ipixuna do pará-pa, nordeste paraense. **Enciclopédia biosfera**, v. 17, n. 34, 2020.

TRINDADE, Beatriz Caroline et al. A importância da conservação da biodiversidade do solo na América Latina para a segurança alimentar e para a promoção do objetivo de desenvolvimento sustentável 2. 2023.

VILLELA, R. **População, território e recursos minerais: riscos e impactos socioambientais associados à mineração industrial no Brasil**. Anais do XXI Encontro Nacional de Estudos Populacionais, 2018. Disponível em: < <http://bit.ly/2WV2zdf>>. Acesso em: 30 out. de 2022.



Universidade do Estado do Pará  
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia - CCNT  
Curso de Graduação em Engenharia Florestal  
Campus V - Belém  
Tv. Dr Enéas Pinheiro, 2626, Marco  
66095-015. Belém - PA  
[www.uepa.br](http://www.uepa.br)