



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

JAIRO MATOS DA ROCHA

**Análise Espacial da Restauração no Bioma Cerrado: Automação e Representação
Cartográfica na Plataforma Araticum**

GOIÂNIA, MARÇO DE 2025

Processo: Documento:
23070.018141/2025-17 5277618

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Jairo Matos da Rocha

3. Título do trabalho

Análise Espacial da Restauração no Bioma Cerrado: Automação e Representação Cartográfica na Plataforma Araticum

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Jairo Matos Da Rocha, Discente**, em 04/04/2025, às 16:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5277618** e o código CRC **A51781EC**.

JAIRO MATOS DA ROCHA

**Análise Espacial da Restauração no Bioma Cerrado: Automação e Representação
Cartográfica na Plataforma Araticum**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Estrutura e Dinâmica Ambiental.

Linha de pesquisa: Monitoramento e Análise de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira

GOIÂNIA, MARÇO DE 2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rocha, Jairo Matos da

Análise da Restauração no Bioma Cerrado [manuscrito] : Automação e Representação Cartográfica na Plataforma Araticum / Jairo Matos da Rocha. - 2025.

58 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Pró reitoria de Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui mapas, gráfico, tabelas, algoritmos.

1. Política ambiental. 2. aprendizado de máquina. 3. mapeamento. 4. acesso à informação. I. Ferreira, Manuel Eduardo , orient. II. Título.

CDU 502/504



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº MD004/2025 da sessão de **Defesa de Dissertação** de **Jairo Matos Da Rocha**, que confere o título de **Mestre em Ciências Ambientais**, na área de concentração em **Estrutura e Dinâmica Ambiental**.

Ao **primeiro dia de abril de dois mil e vinte e cinco**, a partir das **nove horas**, na sala virtual do **Google Meet** <<https://meet.google.com/qmo-jsix-zis>>, realizou-se a sessão pública de **Defesa de Dissertação** intitulada “**Análise Espacial da Restauração no Bioma Cerrado: Automação e Representação Cartográfica na Plataforma Araticum**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Doutor **Manuel Eduardo Ferreira (IESA/UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Doutor **David Roberto Galbraith (School of Geography/University of Leeds)**, **membro titular externo, cuja participação ocorreu através de videoconferência**; Doutor **Denilson Teixeira (EECA/UFG)**, **membro titular interno, cuja participação ocorreu através de videoconferência**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da **Dissertação**, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros.

Proclamados os resultados pelo Doutor **Manuel Eduardo Ferreira (IESA/UFG)**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos membros da Banca Examinadora, ao **primeiro dia de abril de dois mil e vinte e cinco**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Manuel Eduardo Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 01/04/2025, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Denilson Teixeira, Professor do Magistério Superior**, em 01/04/2025, às 11:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **David Roberto Galbraith, Usuário Externo**, em 29/04/2025, às 12:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5277617** e o código CRC **3828E7AB**.

RESUMO

O monitoramento de Unidades de Conservação no Cerrado passa por desafios de fiscalização efetiva, bem como averiguação do estado de conservação de cada uma das áreas *in loco*. Esse trabalho se torna mais eficiente com uma abordagem completa de união de técnicas de sensoriamento remoto, servindo como um complemento, juntamente ao aprendizado de máquina, e recursos de processamento online. Diante disso, o objetivo desse estudo foi construir uma metodologia de classificação e descrição textual e visual automatizada, de alta resolução espacial, das áreas de restauração no bioma Cerrado. Utilizou-se dados georreferenciados das áreas de restauração para as classificações de uso do solo com base em três produtos auxiliares com resolução de 4 m, e, depois, a delimitação dos pontos de amostragem pelo método de *geohash*. A tomada de decisão no momento da classificação foi dada pelo algoritmo de aprendizado de máquina *Random Forest*. Foram identificados 8.161 polígonos de áreas de restauração em 11 unidades federativas, sendo os estados que mais se destacaram por quantidade de área restaurada São Paulo (7.705 ha) e Piauí (3.714 ha). A classificação das áreas, com acurácia de 80%, abrangeu 19 classes de uso do solo, variando entre cobertura florestal, agricultura e pastagem. Com o programa desenvolvido para a geração de relatórios automatizados, foi possível sintetizar as informações descritivas das áreas de restauração em formato de texto e em formato de imagem, além de um mapa de classificação final de uso do solo.

Palavras-chave: Política ambiental, aprendizado de máquina, mapeamento, acesso à informação

ABSTRACT

Monitoring Conservation Units in the Cerrado Brazilian biome involves challenges related to effective monitoring and verification of the conservation status of each area in situ. This work becomes more efficient with a comprehensive approach that combines remote sensing techniques, serving as a complement to machine learning and online processing resources. Therefore, the objective of this study was to build an automated high-spatial-resolution classification, and textual and visual description methodology for restoration areas in the Cerrado. Georeferenced data from restoration areas were used for land use classifications based on three auxiliary products with a 4 m resolution, and then the sampling points were delimited using the geohash method. Decision-making at the time of classification was carried out by the Random Forest machine learning algorithm. A total of 8,161 polygons of restoration areas were identified in 11 federative units, with the states that stood out most in terms of the amount of restored area being São Paulo (7,705 ha) and Piauí (3,714 ha). The classification of the areas, with 80% accuracy, covered 19 land use classes, ranging from forest cover, agriculture and pasture. With the program developed for generating automated reports, it was possible to synthesize the descriptive information of the restoration areas in text and image format, in addition to a final land use classification map.

Keywords: Environmental policy, machine learning, mapping, access to information

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, sou muito curioso e ávido por aprender coisas novas e solucionar problemas. Minha curiosidade foi o que me levou da área de Tecnologia da Informação para uma mescla entre programação e pesquisas ambientais. **Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Aldecina e Jair, ao meu padrasto, Pará e minhas três irmãs, Viviane, Verônica e Jackeline. A minha conquista da Pós-Graduação é uma conquista para toda a nossa família.**

Sou grato por cada passo que pude dar em minha carreira profissional e, por isso, gostaria de listar os locais mais importantes para minha formação e que guardo imenso apreço. Em 2016, me tornei bolsista no **Instituto de Pesquisas Ambientais da Amazônia - IPAM**, o que abriu portas para novos desafios. Foi nesse ano que trabalhei com Campbell Scientific dataloggers em campo e desenvolvi relatórios com dados de temperatura, umidade do ar, precipitação e insolação para estudos ecológicos. Observei o desenvolvimento e os impactos do fogo utilizando Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (drones). Além disso, desenvolvi sites para a Fazenda Tanguro (MT). **Agradeço ao Prof. Dr. Divino Silvério, ao Dr. Claudinei Oliveira, à Dra. Ludmilla Rattis e Dr. Leonardo.**

A partir do IPAM, conheci a **Universidade Estadual de Mato Grosso - UNEMAT** e a **University of Leeds** em 2019. Com a UNEMAT e Leeds como parceiras, expandi meus conhecimentos em Sensoriamento Remoto, Ecologia e Biologia Vegetal. Realizei análises com índices espectrais usando satélites e Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (drones), desenvolvi estufas para observação da vegetação sob estresse hídrico e participei da manutenção das torres de dados climáticos nos projetos BIO-RED e Arboles.

Apoiei cerca de 10 projetos, do nível de graduação ao pós-doutorado, durante meu período nessas instituições. Em 2020, **visitei a University of Leeds na Inglaterra** para aperfeiçoar conhecimentos e compartilhar experiências em laboratórios que desenvolviam ferramentas de medição do fluxo de seiva e controle climático de estufas. Gostaria de destacar meus **sinceros agradecimentos ao Prof Dr. David Gailbraith, Prof Dr. Emmanuel Gloor e Rayane Abreu.**

Em 2021, fui convidado a integrar o **Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento - Lapig**, para apoiar diversas pesquisas do núcleo de Pastagem como **analista de desenvolvimento** e manter as plataformas do Laboratório ativas, com ênfase no **Atlas das Pastagens** (<https://atlasdaspastagens.ufg.br/>). **Agradeço ao professor Laerte Ferreira pelo convite.**

Em 2022, iniciei as aulas de mestrado no CIAMB, onde pude aprofundar a teoria em diversos conhecimentos que já aplicava na prática nos laboratórios que frequentei. **No mesmo ano, participei do podcast "Expressões"**, voltado para divulgar as Ciências Ambientais e as pesquisas realizadas no PPG, atuando como editor de áudio e ajudando na seleção de entrevistados. Essa experiência foi enriquecedora, pois destacou a importância da divulgação científica. **Hoje, o podcast está sob nova direção e se chama "Evidenciência". Agradeço especialmente Angelica Goetz e Victória pelo convite para o podcast e às Profas Dra Daniela Melo e Karla Emanuela, por nos proporcionarem a concretização desse projeto de divulgação científica.**

Desde minha entrada no Lapig, atuo intensamente dando apoio em diversos projetos de pesquisa. Atualmente, desenvolvo ferramentas para a **análise de imagens de satélite Lidar (ICESAT-2) aplicadas às pastagens, definindo a altura da vegetação e gerando insights relevantes**, auxiliando em todos os desafios de Maria Hunter (pós-doutoranda), **a quem agradeço pela oportunidade de trabalharmos juntos.**

Também apoio o **projeto de bibliometria sobre pastagens**, para o qual criei scripts capazes de pesquisar informações de artigos a partir da API da OpenAlex, filtrá-los e disponibilizá-los em uma plataforma onde as pesquisadoras podem analisar os dados de forma mais rápida. Também desenvolvi um ecossistema importante para as pesquisas, que facilita as análises estatísticas mais demoradas e a geração de gráficos (science hub do Lapig). As duas criações foram inicialmente voltadas aos projetos conduzidos pela Profa. Dra. Ana Carolina Andrade, Nathalia Teles (doutoranda) e Maria Hunter. **Obrigado pela confiança de vocês no que posso desenvolver.**

Esses projetos fazem parte do **Global Pasture Watch**, uma aliança internacional de estudos sobre pastagens. Nesse âmbito, também mantenho o parque de máquinas para desenvolvimento do modelo Century (estimativa de carbono em pastagens), auxílio na geração de gráficos e insights, usados por Gabriella Arruda (pós-doutoranda) e Isabella (mestranda). **Mais uma vez, gostaria de expressar a gratidão por esta interação.**

Auxílio, ainda, com enfoque na **manutenção da Plataforma Araticum**, que disponibiliza informações sobre a restauração do bioma Cerrado. Trabalho próximo aos agentes de restauração e organizadores desses dados espaciais, publicando polígonos de restauração e garantindo que seguem os padrões mínimos definidos pelos Grupos de Trabalho da Rede Araticum. **Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira, por me ajudar com minha dissertação e me aproximar da manutenção da Plataforma Araticum.**

Agradeço às minhas amigas queridas, sempre disponíveis para me apoiar e ajudar com tudo que podiam. Bianca Rebelatto (obrigado por cada auxílio, passeio, bar e dia de ‘coworking’), Carla Heloísa, Nayane, Franciele Fath, Lythielle Silva, Georgina e tantas mais, vocês foram essenciais em tempos tão difíceis, amo cada uma de vocês.

Finalmente, registro minha gratidão por meu sobrinho, companheiro e melhor amigo, Pedro Lucas, que faleceu após seis meses de tratamento contra um câncer extremamente raro e agressivo. Permanecer de pé após essa perda foi possível graças à força que ele demonstrou em todos os momentos. O luto ainda é intenso, como enfrentar uma tempestade com um guarda-chuva furado. Ainda assim, posso dizer que foi uma honra dividir quase 20 anos com ele.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	6
1.1 Introdução geral.....	6
1.2.1 Objetivo geral.....	7
1.2.2 Objetivos específicos.....	7
1.3 Estruturação da Dissertação.....	7
CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
2.1. O bioma Cerrado e uso da terra.....	8
2.2. Cenário da restauração no bioma.....	8
2.3. Sensoriamento remoto como ferramenta para a restauração.....	9
2.3.1 Mapeamento aberto como aliado a restauração.....	11
CAPÍTULO III: METODOLOGIA.....	12
3.1 Área de estudo.....	13
3.2 Análise de geometria.....	14
3.3 Amostragem de classes.....	16
3.4 Classificação de cobertura do solo.....	21
3.5 Geração de relatórios unindo análises de polígonos e classificações.....	23
CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE RESTAURAÇÃO DO CERRADO DISPONÍVEIS NA PLATAFORMA ARATICUM.....	25
4.2 MONITORAMENTO DE RESTAURAÇÃO NO CERRADO USANDO SENSORIAMENTO REMOTO.....	33
4.3 RELATÓRIOS E SCRIPTS GERADOS NA PESQUISA.....	41
4.3.1 Relatório de classificação do uso do solo.....	41
4.3.2 Discretização dos scripts gerados.....	45
CAPÍTULO V: CONCLUSÕES GERAIS.....	49
CAPÍTULO VI: REFERÊNCIAS.....	50

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

1.1 Introdução geral

O Cerrado brasileiro é a área de savana mais biodiversa do mundo, destacando-se por sua biodiversidade única, a qual abriga mais de 4.800 espécies de plantas e vertebrados endêmicos (Sloan *et al.*, 2014) que dependem das formações naturais para alimentação e abrigo (Dalle Laste; Durigan; Andersen, 2019). Entretanto, o bioma tem enfrentado uma significativa perda de área natural, com cerca de 1,11 milhão de hectares já desmatados (MapBiomias Brasil, 2023), o que, em números conservadores, representa 51% da área original.

Com uma extensão de aproximadamente 2,04 milhões de km², apenas 8,3% (166 mil km²) de sua área é protegida por Unidades de Conservação (UCs) (Alves; Cherem, 2022). As áreas já consideradas como em estado de conservação passam por desafios de fiscalização efetiva, bem como averiguação do estado de conservação de cada uma das áreas *in loco*. (Bernard; Penna; Araújo, 2014; Colman et al., 2024). Para enfrentamento dos problemas ligados ao controle dessas áreas, é importante que o monitoramento seja feito usando metodologias confiáveis por um longo período, garantindo checagens regulares e aumentando, assim, o seu valor (Federici, Lee & Herold, 2017).

O monitoramento se torna mais eficiente quando feito com uma abordagem completa, incorporando dados de sensoriamento remoto de alta resolução. Utilizar imagens de satélite permite uma abordagem de diferentes escalas, a depender da necessidade da supervisão e do tipo de área a ser trabalhada (Keenan et al., 2015). A união de técnicas de sensoriamento disponibiliza informações muitas vezes não alcançadas quando se está em campo, servindo como um complemento juntamente ao aprendizado de máquina e recursos de processamento online (Petersen et al., 2018).

Diante dos desafios apresentados, esta dissertação de mestrado visa preencher a lacuna de conhecimento sobre o processo de restauração em áreas de Cerrado, utilizando uma abordagem tecnológica de código aberto a partir do desenvolvimento de ferramentas automatizadas para compreender a dinâmica das áreas de restauração. Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para melhorar a compreensão da restauração em áreas degradadas do Cerrado e promova maior eficácia das estratégias de conservação e restauração, em todo o bioma. Além disso, espera-se contribuir para a sustentabilidade ambiental e o bem-estar das comunidades que dependem dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelo Cerrado, tanto no presente quanto no futuro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma abordagem tecnológica de livre acesso para classificação e caracterização de áreas de restauração no bioma Cerrado.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Analisar a distribuição das áreas de restauração no Cerrado em relação às Unidades Federativas em que se encontram;
- 2) Classificar e caracterizar o uso da terra nas áreas de restauração, incluindo o entorno próximo, utilizando imagens de alta resolução espacial;
- 3) Desenvolver ferramentas para a geração de relatórios automatizados sobre as áreas de restauração.

1.3 Estruturação da Dissertação

Esta dissertação é fundamentada na análise de uma variedade de dados provenientes de fontes gratuitas, incluindo informações espacializadas de áreas de restauração fornecidas por Organizações Não Governamentais (ONGs), mosaicos orbitais da constelação *Planet*, e ferramentas de análise geoespacial. Além disso, são utilizadas aplicações de código aberto e bibliotecas de programação em Python, visando desenvolver análises que apoiem o manejo e o gerenciamento de áreas de restauração no bioma Cerrado. Para alcançar esse propósito, a dissertação está estruturada em quatro capítulos:

- 1) O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral sobre o tema da dissertação e objetivos;
- 2) O segundo capítulo aborda o referencial teórico acerca das ameaças e o cenário de restauração do bioma, e ferramentas eficazes no monitoramento de áreas;
- 3) O terceiro capítulo detalha os métodos adotados para o desenvolvimento da pesquisa;
- 4) O quarto capítulo traz resultados concernentes aos objetivos, analisando as áreas de restauração, tais como sua distribuição geográfica, uso do solo e demonstração de relatórios.

CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O bioma Cerrado e uso da terra

O Cerrado, também conhecido como a savana brasileira, é um dos biomas mais ricos em biodiversidade do mundo, abrigando cerca de 5% da biodiversidade global (Klink; Machado, 2005). Essa riqueza biológica se traduz em uma variedade de habitats e espécies que desempenham funções vitais para a manutenção dos ecossistemas e dos serviços providos (Oliveira e Marquis, 2002; Santos et al., 2019; Nóbrega et al., 2020)

O bioma é caracterizado por uma grande diversidade de uso e cobertura do solo, resultante de suas características naturais e atividades antrópicas. Originalmente, ele apresentava uma vegetação predominantemente composta por savanas, florestas estacionais, campos limpos e campos sujos, formando um mosaico de fisionomias vegetais (Batalha, 2011). No entanto, a ocupação humana e a expansão agropecuária têm transformado significativamente essa paisagem, com suas áreas de vegetação intactas ou pouco alteradas situadas em regiões de difícil acesso, UCs e Terras Indígenas (Fonseca & Bustamante, [s. d.]; Brasil, 2016), sendo o desmatamento uma das principais causas da perda de vegetação natural no Cerrado (Rodrigues *et al.*, 2022).

A conversão de áreas naturais para uso agropecuário é responsável pela perda significativa de habitats e pela fragmentação da paisagem, ameaçando a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos (Grecchi *et al.*, 2014; Caballero *et al.*, 2023), devido à compactação do solo, perda de nutrientes, redução do armazenamento de carbono e a alteração dos padrões hidrológicos (Coelho *et al.*, 2020). Entre 1985 e 2023, foi registrada uma conversão da ordem de 27% no Cerrado (Mapbiomas, 2023), onde a criação de gado é a atividade predominante (Bolfé, Sano & Campos, 2020), com grandes áreas de vegetação nativa transformadas em gramíneas exóticas, levando à compactação do solo e à redução da sua fertilidade (Sambuichi et al., 2012).

2.2. Cenário da restauração no bioma

Ações de restauração dentro do bioma Cerrado, incluindo sua regeneração e reflorestamento, estão vigentes desde 1949, com a criação da primeira área de conservação do Cerrado (Horto Floresta de Silvânia – Goiás). Essas unidades não foram instauradas de forma homogênea no bioma, com sua distribuição geográfica desigual por toda a sua

extensão, como a concentração de UCs no estado de São Paulo (Santos & Cherem, 2022). Devido a sua importância, elas são amparadas por programas governamentais e não governamentais, institutos de pesquisa e empresas, visando, principalmente, o controle de emissões de gases por meio de um crescente mercado de carbono (Almeida *et al.*, 2022; Adams *et al.*, 2021; Chazdon *et al.*, 2022; Daronco *et al.*, 2013).

Os desafios para as UCs incluem a complexidade ecológica, a decisão de práticas de restauração mais eficazes e a falta de georreferenciamento de boa parte delas (Santos & Cherem, 2022), o que torna a identificação e o estudo mais difíceis. Outro desafio está na criação e execução de políticas eficazes para restaurar ecossistemas degradados e na prevenção de futuras degradações (Mirzabaev; Wuepper, 2023), com atenção especial às legislações ambientais. Destaca-se também a necessidade de investimentos para o incentivo de sistemas produtivos de baixo impacto ambiental e que busquem conciliar práticas mais sustentáveis no âmbito da agricultura regenerativa.

O Brasil possui o compromisso assumido internacionalmente de recuperar 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030. Segundo dados da plataforma do Observatório da Restauração e Reflorestamento do Brasil (ORR, 2024), pouco mais de 79 mil hectares da sua cobertura vegetal original foram recuperados, o que resulta em menos de 1% do seu compromisso.

2.3. Sensoriamento remoto como ferramenta para a restauração

A atividade de restauração pode ser compreendida como o processo de auxiliar/assistir à recuperação de ecossistemas degradados, danificados ou destruídos em função de atividades humanas (Clewell; Aronson; Winterhalder, 2004). As iniciativas de restauração são essenciais para garantir a sustentabilidade das atividades humanas, além de assegurar a vida das demais espécies. Alguns dos objetivos na organização de projetos de restauração podem ser restaurar bacias hidrográficas para assegurar o futuro abastecimento de água (Honda; Durigan, 2017), garantir a manutenção da biodiversidade (van Oosten, 2013) e controlar a desertificação (Liu *et al.*, 2020).

Para monitorar a biodiversidade, o sensoriamento remoto é uma ferramenta eficiente, se não uma das principais, fornecendo dados em diferentes escalas espaciais e temporais sobre a cobertura vegetal por meio de imagens aéreas e de satélite, aplicando-se índices espectrais, mapeando o uso do solo, analisando a topografia, e entre outras aplicações. As diversas aplicações auxiliam na identificação de áreas degradadas para a restauração, bem

como no monitoramento da eficácia dos métodos e/ou do próprio sucesso de uma intervenção ao longo do tempo (Adorno *et al.*, 2021; da Silva *et al.*, 2021), e na avaliação de padrões de degradação de pastagem em diferentes regiões (Fernandes *et al.*, 2018; Valle Júnior *et al.*, 2019; Veloso *et al.*, 2020).

O sensoriamento remoto também permite avaliar mudanças na estrutura e composição da vegetação, sendo útil para o monitoramento/mapeamento de áreas nativas ou de restauração florestal. A tecnologia de sensores LiDAR, por exemplo, é capaz de representar em três dimensões uma paisagem de vegetação densa, coletando informações tanto em cima quanto abaixo do dossel, facilitando a contagem automática de árvores (Ferreira *et al.*, 2019) e a estimativa de espécies e estoque de biomassa. Ainda, essa técnica pode ser utilizada para monitorar iniciativas que visam restaurar a funcionalidade dos ecossistemas, possibilitando preencher lacunas de conhecimento em projetos específicos para cada bioma ao fornecer dados sobre a conectividade da paisagem e impactos sobre a biodiversidade (Kowe; Mutanga; Dube, 2021; Schmidt *et al.*, 2024), incluindo a relação da vegetação com os aspectos do clima, solo e relevo.

Embora essa ferramenta ofereça várias vantagens para a restauração ecológica, também apresenta desafios técnicos significativos. A resolução espacial e temporal dos dados pode limitar a capacidade de detectar mudanças sutis na vegetação ou na biodiversidade, como, por exemplo, a necessidade da alta precisão na detecção da erosão do solo e da recuperação da vegetação para fornecer percepções úteis para a restauração de pastagens degradadas (Chen *et al.*, 2023). A interpretação desses dados também requer, muitas vezes, habilidades técnicas avançadas em conjunto com o acesso a softwares especializados (Lee *et al.*, 2023), além da necessidade de integração para fornecer uma visão holística do ecossistema. Pettorelli e Schulte to Bühne (2023) enfatizam a importância de combinar dados de diversas fontes e escalas para monitorar a conectividade da paisagem e os impactos da restauração sobre a biodiversidade, o que requer abordagens interdisciplinares e colaborações robustas.

O custo associado à aquisição e processamento de dados de sensoriamento remoto pode ser limitador, especialmente para projetos de restauração em larga escala. Jia *et al.* (2023) mencionam a necessidade de financiamento adequado para a implementação e monitoramento contínuo de projetos de restauração utilizando sensoriamento remoto, o que pode ser um obstáculo para muitas organizações. As opções viáveis para utilização do sensoriamento remoto como ferramenta em projetos de restauração dependem da busca por produtos gratuitos, como imagens de satélite e programas de código aberto, que contribuem

para a diminuição de custos associados (Cisneros-Araújo *et al.*, 2021). O sensoriamento deve ser utilizado como apoio para direcionar os esforços e avaliações de campo, visando diminuir o tempo de deslocamento e de execução no acompanhamento e mensuração da restauração.

2.3.1 Mapeamento aberto como aliado à restauração

A disponibilização de dados públicos sobre a conservação e a restauração ecológica é importante para o desenvolvimento de novas estratégias e planejamento de ações neste tema. O sensoriamento remoto como aliado permite que pesquisadores e gestores acessem informações sobre o estado atual dos ecossistemas, facilitando a identificação de áreas prioritárias para a intervenção (Wang *et al.*, 2024). A prática de ciência aberta (pública e facilmente acessível) e a avaliação da reprodutibilidade computacional são essenciais para as práticas de restauração, garantindo que os resultados das pesquisas sejam consistentes, confiáveis e apresentem custo-benefício de viabilidade das ações, o que é fundamental para orientar decisões de manejo e políticas públicas (Campbell; Dixon; Handcock, 2023; del Río-Mena *et al.*, 2020).

A integração de dados abertos com tecnologias de divulgação pode enriquecer a compreensão dos processos de restauração. Iniciativas com informações online, como a Vitrine da Restauração (SOBRE, 2024), Plataforma Araticum (<https://araticum.lapig.iesa.ufg.br/>) e o Observatório da Restauração e do Reflorestamento (<https://observatoriodarestauracao.org.br/home>), são importantes ao tornar públicas e acessíveis informações sobre projetos acerca da vegetação nativa e de sua restauração, promovendo, assim, uma melhor comunicação e engajamento da sociedade, incluindo especialistas, iniciativas lideradas por ONGs e fundações ou governos municipais, estaduais e federal (CNPGC, 2023; CNMP, 2020; ORR, 2024; Araticum, 2024).

A integração de dados de monitoramento de biodiversidade existentes pode melhorar a compreensão das necessidades ecológicas e de conservação, facilitando ações mais rápidas e eficazes. O uso de dados abertos permite que os recursos limitados sejam alocados de maneira mais eficiente, concentrando-se em ações diretas de conservação em vez de coleta contínua de dados (Binley *et al.*, 2023). A transparência e a acessibilidade dos dados são fundamentais para a conservação de ecossistemas, e o compartilhamento rápido de dados facilita o desenvolvimento de soluções para o planejamento da conservação de habitats (Lortie *et al.*, 2023).

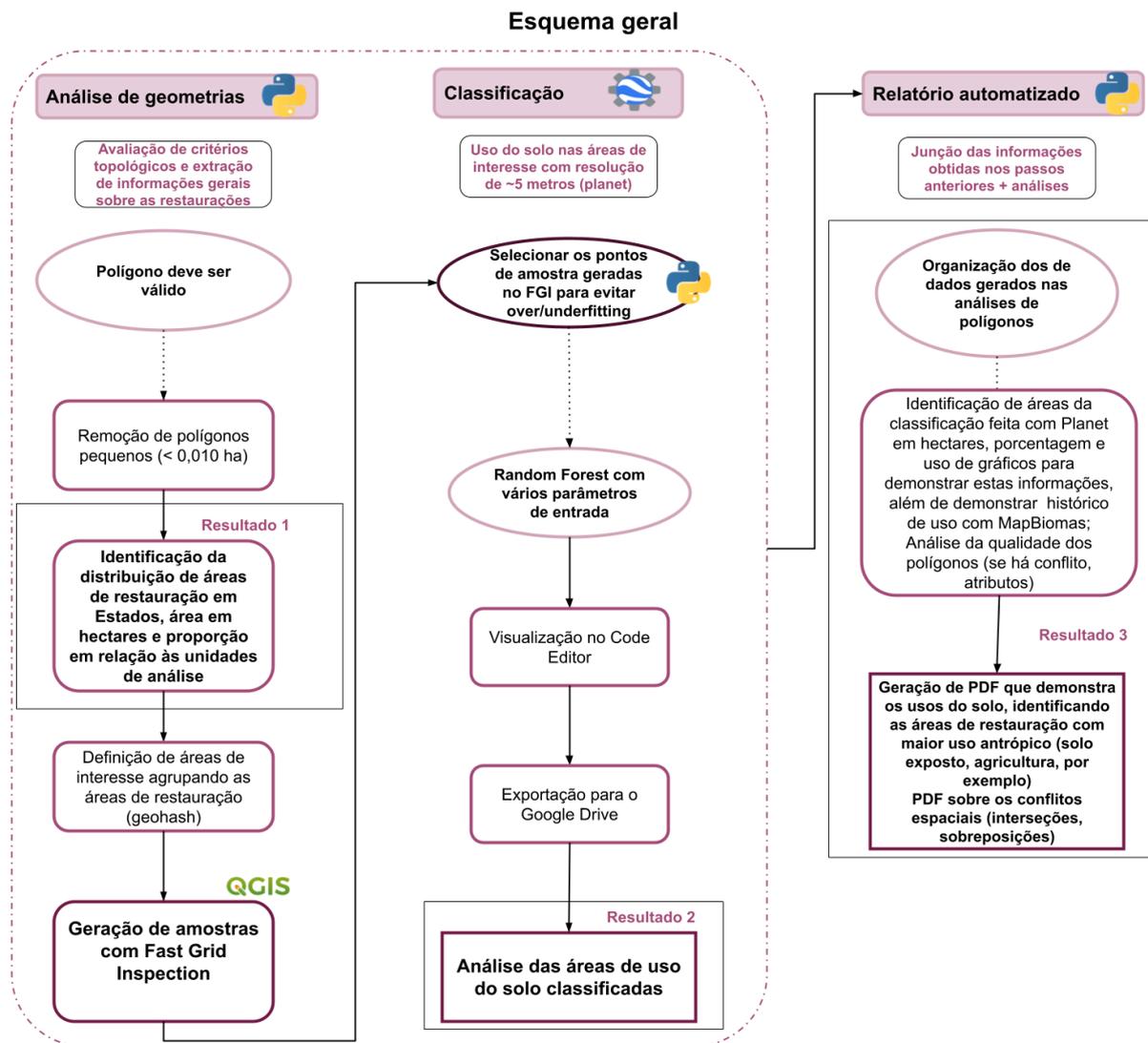
CAPÍTULO III: METODOLOGIA

A metodologia geral desenvolvida neste projeto busca desenvolver três grandes resultados: 1) análise descritiva das áreas de restauração declaradas; 2) nova metodologia para classificação de uso do solo; 3) documento piloto de um relatório automático para áreas de restauração do Cerrado.

Este trabalho pode ser resumido em três grandes etapas metodológicas (Figura 1) para alcançar os objetivos. A primeira etapa envolve o pré-processamento dos polígonos de restauração registrados, que inclui a verificação de sua validade, a análise da distribuição dos polígonos entre UCs, a definição das áreas de interesse e a amostragem de classes previamente identificadas com inspeção visual e apoio de produto externo, que serão utilizadas na segunda etapa de classificação.

A segunda etapa concentra-se na classificação do uso do solo, incluindo sua a quantificação. A terceira e última etapa consiste na construção de um algoritmo capaz de integrar os resultados da primeira e segunda etapa, retornando informações de forma automática. O relatório automatizado deverá ser formatado a fim de facilitar a visualização dos dados pelo usuário e/ou tomador de decisão, com valores sumarizados dos principais pontos de atenção sobre as áreas de restauração.

Figura 1 - Esquema geral da metodologia desenvolvida a fim de obter os dados referentes às áreas de restauração declaradas (análise de geometrias), classificação de uso e cobertura do solo e os documentos gerados automaticamente para todas as áreas de restauração do bioma Cerrado (relatório automatizado).



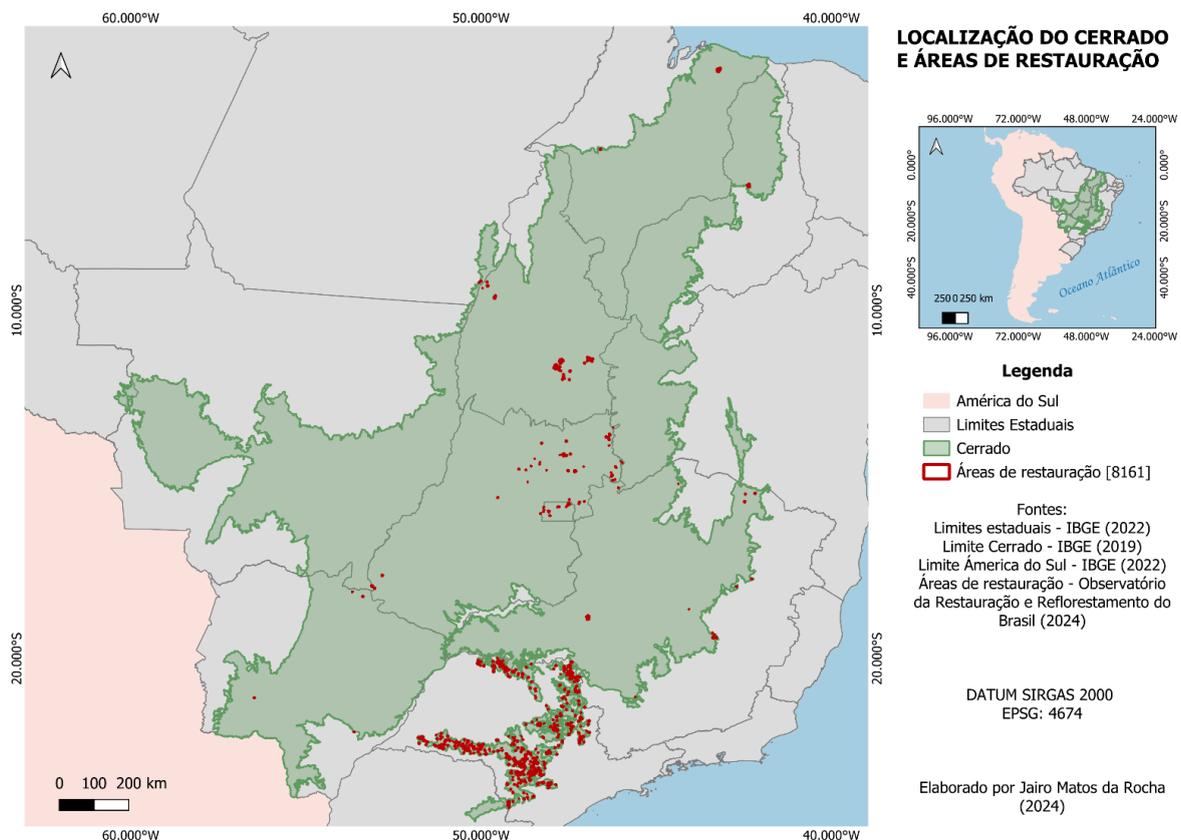
Fonte: Autoria própria (2024).

3.1 Área de estudo

Buscou-se trabalhar com áreas de restauração declaradas dentro dos limites do bioma Cerrado (Figura 2). Essas áreas foram acessadas por meio do vínculo entre a Universidade Federal de Goiás (UFG) e a Rede Araticum, possibilitando a avaliação de dados de diversas ONGs através do Observatório da Restauração e Reflorestamento do Brasil (ORR). Foi obtido um total de 8.161 polígonos nas 11 UF, sendo elas: Tocantins (TO), Piauí (PI),

Rondônia (RO), Pará (PA), Goiás (GO), Distrito Federal (DF), Maranhão (MA), Minas Gerais (MG), São Paulo (SP), Bahia (BA) e Mato Grosso do Sul (MS). Foram considerados apenas polígonos dentro dos limites do bioma Cerrado.

Figura 2 - Localização de 8.161 áreas de restauração (em vermelho) no bioma Cerrado mapeadas pela UFG, Rede Araticum e ORR, abrangendo 11 Unidades Federativas brasileiras: Tocantins, Piauí, Rondônia, Pará, Goiás, Distrito Federal, Maranhão, Minas Geais, Pará, São Paulo, Bahia e Mato Grosso do Sul.



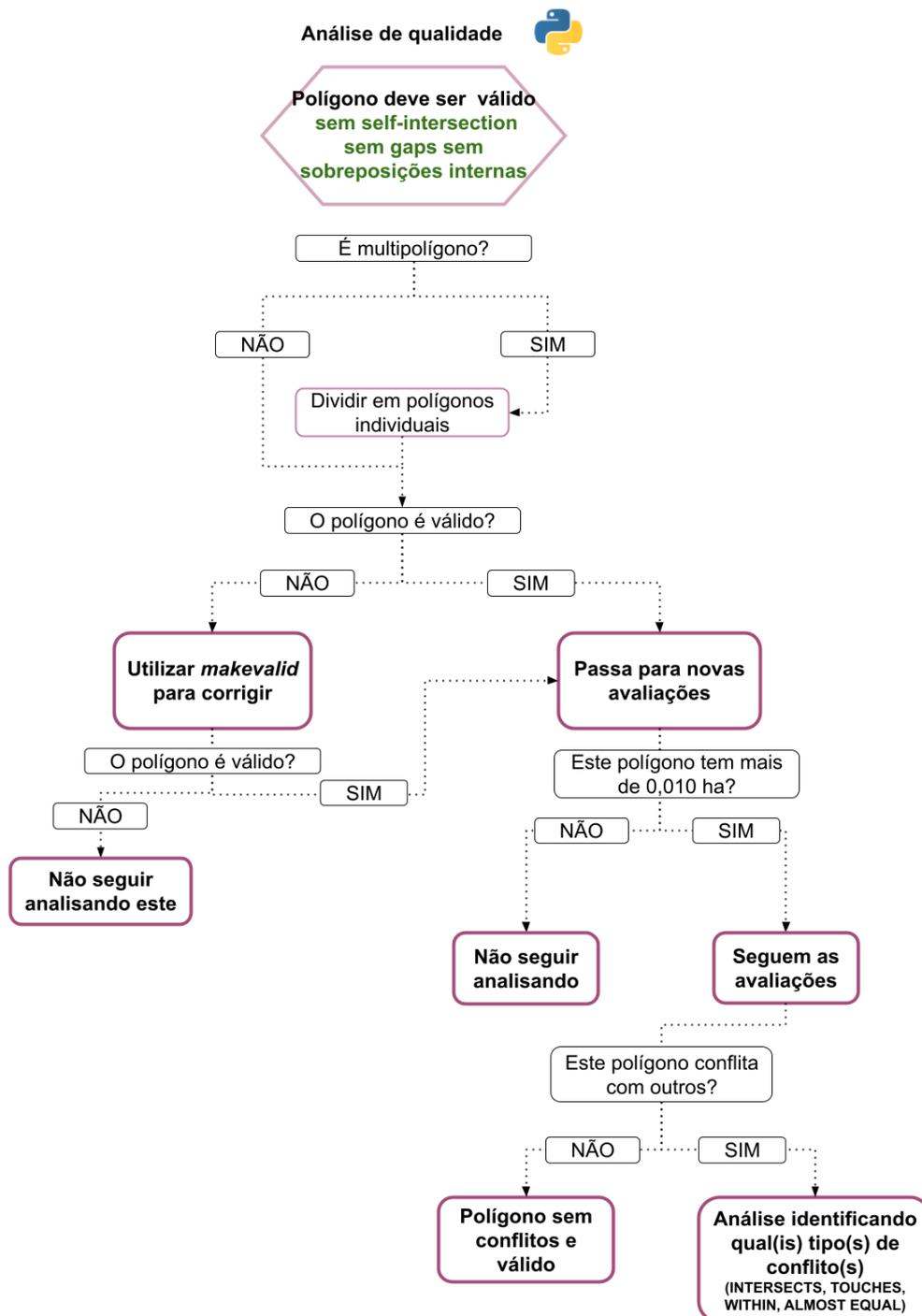
Fonte: Autoria própria (2024).

3.2 Análise de geometria

As áreas de restauração foram obtidas em formato *geopackage* e pré-processadas utilizando a biblioteca *python Geopandas* (Jordahl *et al.*, 2020). A análise de geometria (Figura 3) consistiu na avaliação da qualidade espacial dos polígonos de restauração, em que é feita a identificação de conflitos nos vetores que podem gerar valores superestimados na área total de restauração ou, ainda, gerar dificuldades de governança para as instituições que são parceiras de restauração. Os critérios definidos para avaliar os polígonos foram baseados

em Weigong (2009), que considera como parâmetro de avaliação a consistência lógica dos dados espaciais, correção e integridade dos dados e os atributos topológicos para assegurar um controle de qualidade.

Figura 3 - Desenvolvimento da lógica utilizada na análise de geometria, retornando polígonos com conflitos não identificados e polígonos sem nenhum conflito e válido para uso.



Fonte: Autoria própria (2024).

Primeiramente, foi verificada a presença de multipolígonos, que foram divididos em polígonos individuais para facilitar a identificação correta de suas UFs. Depois, foram observados os critérios de topologia e identificados os polígonos maiores que 0,01 ha para serem válidos na lógica da restauração brasileira (consistência lógica – valores definidos pelos times ORR e Rede Araticum). Quando encontrados polígonos conflituosos, eles foram classificados considerando como critério polígonos: que se interseccionam, que se tocam, que estão dentro de outros ou que são quase iguais.

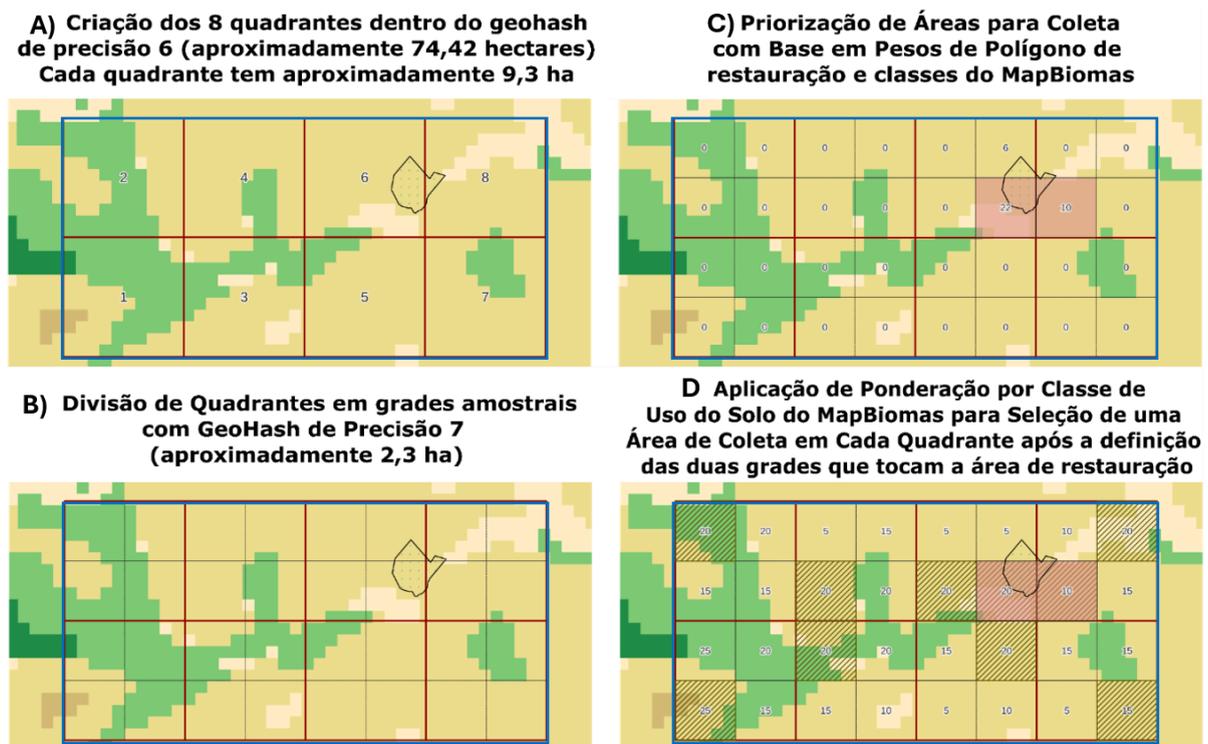
3.3 Amostragem de classes

A amostragem de classes inicia com a delimitação da área de estudo utilizando o algoritmo para dados geoespaciais *geohash* (Figura 4), uma geometria de formato retangular que se baseia na conversão de latitudes e longitudes em códigos de identificação, possibilitando o agrupamento de várias áreas de restauração de acordo com seu novo código (*hash*) em uma precisão de seis dígitos, o que representa aproximadamente 74,4 hectares (Moussalli; Srivatsa; Asaad, 2015; Zhou et al., 2020).

A partir da aplicação do *geohash*, foram desenhadas divisões em seu interior, subdividindo-o em oito quadrantes de 9,3 hectares (Figura 4A). Dentro de cada quadrante são feitas novas subdivisões, mas, desta vez, apenas quatro outros quadrados são desenhados, chegando à granularidade de 2,3 hectares, dividindo ainda mais o retângulo inicial (Figura 4B).

Essa segunda divisão é importante para delimitar uma área menor que priorize a presença de áreas de restauração, tornando o processo de amostragem e classificação mais eficiente. Feito isso, o *geohash* inteiro é analisado considerando cada quadrante menor (2,3 hectares cada), sendo selecionados os quadrados que condizem com essa priorização das áreas de restauração (Figura 4C). Por último, com a seleção de quadrados baseada na presença dos polígonos de restauração, foi feita uma última seleção de área, mas dessa vez, com uma seleção aleatória a fim de caracterizar o que existe ao redor da área de priorização (Figura 4D).

Figura 4 - Ilustração do processo de utilização do *geohash* para amostragem de áreas que atendam aos critérios estipulados para a segunda etapa de classificação: aplicação do *geohash* (retângulo azul gerado semi-aleatoriamente) e criação de quadrantes em seu interior (quadrantes em vermelho) (A), subdivisão dos quadrantes (B), seleção dos quadrantes menores que priorizam polígonos de restauração (C), e seleção de quadrantes menores para caracterização da paisagem (D).



Fonte: Autoria própria (2024).

Com essa base de amostragem, foi realizada a identificação de cobertura do solo com auxílio do programa *Fast Grid Inspection* (FGI) (Andrade, 2023), que foi desenvolvida para o processo de classificação de pastagens a nível global, fornecendo uma forma mais rápida de gerar amostras visuais. Com o FGI, foi possível executar a classificação supervisionada tanto das áreas quanto de sua vizinhança, sem uma alta demanda de memória computacional (Liu *et al.*, 2014).

A etapa de seleção manual dos píxeis utilizou o programa FGI com algumas alterações feitas, sendo elas: adaptação da grade de amostras (Figura 5A) para um metro a mais de resolução, de quatro metros, a fim de gerar amostras de alta qualidade; e incorporação de classes semelhantes ao produto de classificação MapBiomas Coleção 8 (Quadro 1), um projeto brasileiro gratuito de classificação de uso e cobertura do solo (Projeto MapBiomas, 2023), que também foi utilizado para auxiliar a classificação no programa QGIS

(QGIS Development Team, 2024), contando com uma resolução espacial de 30 m. E também foi utilizado o programa Google Earth Pro nesse processo de identificação visual, disponibilizando imagens da superfície terrestre com possibilidade de um acompanhamento histórico das áreas com imagens de maior resolução temporal e espacial, quando disponível (Figura 5B).

Figura 5 – Esquema de exemplo da utilização do *Fast Grid Inspection* personalizado para a pesquisa, com uma das áreas sendo amostrada (A), e da mesma grade de amostragem no Google Earth Pro como segundo apoio visual (B).



Fonte: Autoria própria (2024).

Quadro 1 - Relação entre classes do MapBiomias e classes agrupadas para esta pesquisa. Resumo das 19 classes de uso escolhidas e agrupadas para contemplar as interpretações necessárias para esta pesquisa, em conjunto com as classes do Mapbiomas que foram utilizadas como parâmetro de auxílio visual no QGIS.

Classe MapBiomias	Nome	Classe redefinida	Nome da classe
3	Formação Florestal	2	Formação Florestal
4	Formação Savânica	7	Formação Savânica
5	Mangue	13	Mangue
6	Floresta alagável	9	Áreas alagáveis
7	Restinga arbórea	10	Restinga arbórea
10	Formação Natural não Florestal	14	Formação Natural não Florestal
32	Apicum	17	Apicum
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	9	Áreas alagáveis
50	Restinga herbácea	18	Restinga herbácea
12	Formação Campestre	11	Formação Campestre
29	Afloramento Rochoso	15	Áreas de solo exposto
9	Silvicultura	5	Silvicultura
14	Agropecuária	4	Agropecuária
15	Pastagem	1	Pastagem
20	Cana	3	Agricultura
21	Mosaico de Usos	4	Mosaico de Usos
39	Soja	3	Agricultura
40	Arroz (beta)	3	Agricultura
41	Outras Lavouras Temporárias	3	Agricultura
46	Café	12	Lavoura Perene
47	Citrus	12	Lavoura Perene
48	Outras Lavouras Perenes	12	Lavoura Perene
62	Algodão	3	Agricultura
24	Área Urbanizada	6	Área Urbanizada
25	Outras Áreas não Vegetadas	15	Áreas de solo exposto
30	Mineração	13	Mineração
33	Rio, Lago e Oceano	8	Água
31	Aquicultura	8	Água
26	Corpo D'água	8	Água
----	-----	19	Asfalto

Fonte: Autoria própria (2024).

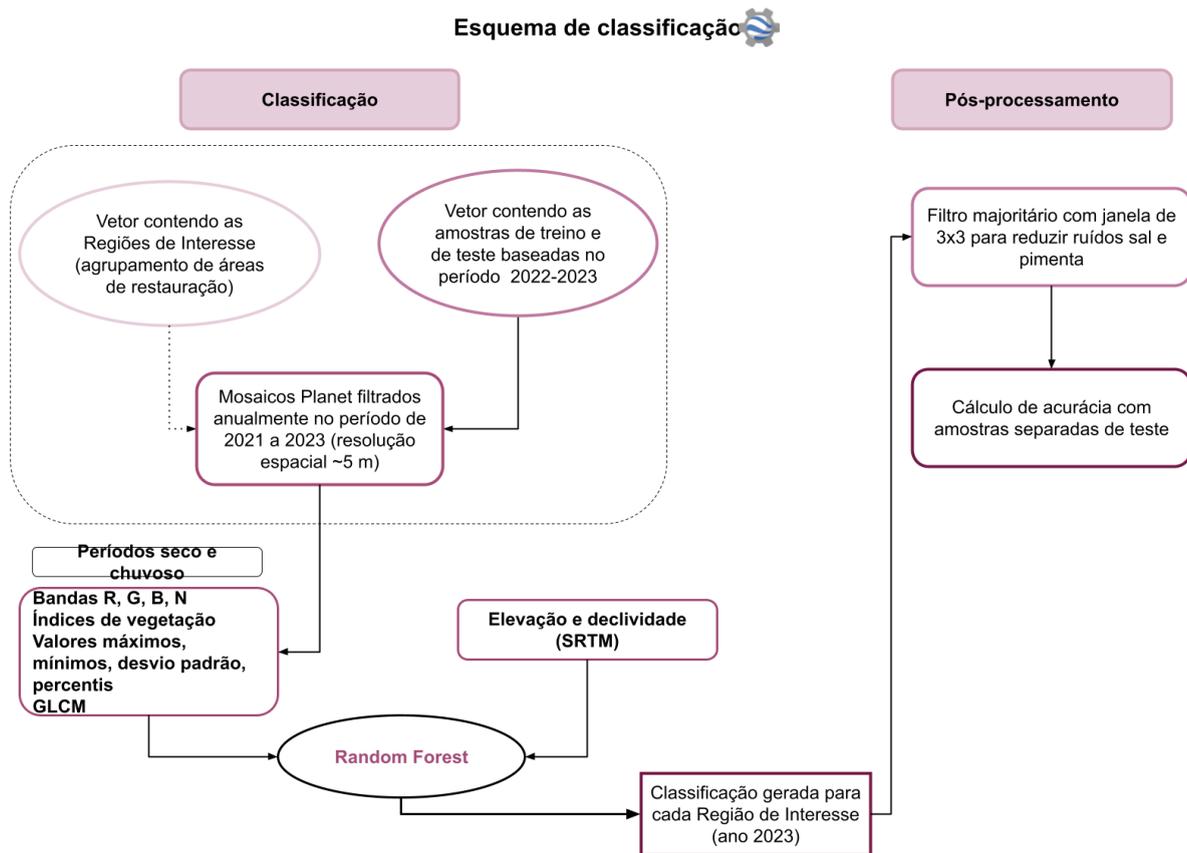
3.4 Classificação de cobertura do solo

A grade gerada a partir do *geohash* foi sobreposta em imagens de alta resolução espacial da constelação *Planet*, com 5 km de resolução da superfície terrestre, numa escala temporal mensal, selecionando-se as grades com o critério de ter ao menos duas delas próximas aos polígonos de áreas de restauração (Figura 5). O acesso pôde ser feito pela distribuição gratuita de imagens da Iniciativa Internacional Norueguesa para o Clima e Florestas (NICFI), programa que oferece imagens para instituições não governamentais e universidades mediante cadastramento (NICFI, 2024).

Os mosaicos *Planet* foram filtrados e agrupados anualmente, considerando o período de janeiro de 2021 a dezembro de 2023 para gerar classificações de uso do solo em alta resolução, considerando a resposta espectral e temporal das feições terrestres e em uma escala que possibilita analisar se há áreas com vegetação campestre (rasteira e esparsa) ou solo exposto.

Após a amostragem com o *plugin* FGI, utilizou-se mais um algoritmo desenvolvido nesta pesquisa para garantir o número mínimo e máximo de classes inseridas no *Google Earth Engine*, considerando critérios que minimizem *overfitting* e *underfitting* na classificação com o *Random Forest* (Montesinos; Montesinos; Crossa, 2022; Cunningham; Delany, 2021). A classificação (Figura 6) das Regiões de Interesse (ROIs) estabelecidas no tópico 3.2 se deu por meio de processamento em nuvem.

Figura 6 - Demonstração dos passos executados na classificação supervisionada.



Fonte: Autoria própria (2024).

Optou-se pelo uso da classificação supervisionada por meio de *Machine Learning*, utilizando as bandas de base, tais como azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (NIR), com adição de índices espectrais de vegetação, como NDVI, EVI, SAVI, GLI e EXG (Huete, 1988; Liu; Huete, 2019; Louhaichi; Borman; Johnson, 2001; Rouse *et al.*, 1974; Woebbecke *et al.*, 1995). Destaca-se que, devido à dinâmica sazonal presente no bioma Cerrado, todos os índices de vegetação passam por influência dos períodos secos e chuvosos; logo, estes foram obtidos de forma separada para os períodos discretizados, garantindo que o resultado da classificação tenha a sazonalidade em consideração, principalmente para as vegetações nativas e cultivos agrícolas que passam por mudanças nestes períodos (Alberton *et al.*, 2019; José *et al.*, 2019).

Características de entropia e contraste da banda do infravermelho próximo obtidas por GLCM (*Gray Level Co-Occurrence Matrix*) também foram agregadas ao grupo de informações, sendo úteis para captar a rugosidade e textura dos objetos captados pelo satélite, sendo uma camada que favorece a identificação de padrões no *Machine Learning*. Além

destes dados de entrada, também utilizaram-se informações de elevação e declividade da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Adotou-se como pós-processamento a aplicação de um filtro majoritário com janela (*kernel*) de 3 x 3 pixels para permitir a diminuição do ruído “sal e pimenta” para cada ano, e sem modificar a imagem classificada para não distorcer o resultado. Esta aproximação segue conforme o indicado por Dong *et al.* (2006), que enfatiza a importância da observação para escolher a melhor janela de filtro. A classificação contou com uma média de 25.000 pontos para cada área de interesse (*geohash*), com 70% usados para treinar o modelo e 30% para testar sua acurácia, utilizando o índice Kappa e a matriz de confusão como apontamentos de qualidade do resultado. Após estes passos, as imagens classificadas foram salvas em nuvem (*Google Drive*) para a etapa posterior.

3.5 Geração de relatórios unindo análises de polígonos e classificações

O relatório automatizado foi desenvolvido com a linguagem de programação *Python*, utilizando a estrutura do *Jupyter Notebook*, um ambiente conhecido como caderno computacional, que permite o uso de comandos e o armazenamento em forma literária, o que torna amigável ao usuário humano com visual agradável de figuras e textos (Dombrowski; Gniady; Kloster, 2023). Além destas vantagens, o ambiente *Jupyter* também está integrado nas plataformas Google, por meio do *Google Colaboratory*, o que expande ainda mais as possibilidades de pesquisas *open science* por sua fácil replicabilidade (Mendez et al., 2023; Beg et al., 2021; Samuel; Mietchen, 2024).

Desta forma, o resultado deste processo compreende dois produtos: 1) *Jupyter Notebooks* que podem facilmente ser usados ou adaptados por qualquer instituição que tenha interesse na sua aplicação e 2) documentos no formato PDF resultantes do código. Para esta pesquisa, os relatórios em PDF contêm informações sobre geometrias conflitantes e tamanho das geometrias envolvidas no conflito, além da avaliação do uso do solo de cada geometria com mapas e gráficos para apoio visual. Todos os resultados gerados serão disponibilizados para a rede Araticum e demais instituições interessadas em avaliar suas áreas.

O primeiro modelo de PDF automatizado foi desenvolvido com as informações de qualidade dos polígonos, levantadas em etapas anteriores foram organizadas para demonstrar os conflitos de polígonos de restauração em mapas, demonstrando cada polígono envolvido em interseções, com os metadados individuais para observação (preenchimento das colunas do arquivo vetorial).

O segundo modelo de relatório destaca o histórico de uso do solo pela classificação do MapBiomias, destacando o ano declarado de início da restauração e pela classificação executada nos mosaicos *Planet* para o ano de 2023, com maior resolução espacial. Com esse tópico, foi possível identificar os casos de restaurações com mais de 51% da sua área ocupada por solo exposto, cultivo agrícola, pastagem ou construção no último ano analisado, o que permitiu indicar usos incorretos e reforçar a atenção para estes locais que podem estar com problemas de manutenção ou deslocados.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE RESTAURAÇÃO DO CERRADO DISPONÍVEIS NA PLATAFORMA ARATICUM¹

Introdução

O Cerrado, um dos biomas mais ricos em biodiversidade do mundo, é considerado um hotspot de biodiversidade devido à sua alta taxa de endemismo e à pressão crescente que enfrenta por atividades humanas. Historicamente, o Cerrado tem sido alvo de desmatamento intensivo, impulsionado principalmente pela expansão agrícola para o cultivo de soja e a criação de gado. Essa conversão de terras naturais em áreas agrícolas tem levado à elevada fragmentação de habitats, perda de biodiversidade e degradação do solo. Como resultado, vastas áreas do Cerrado tornaram-se degradadas, necessitando de esforços de restauração para recuperar suas funções ecológicas e sociais, e assim proteger a rica diversidade de espécies que dependem desse complexo bioma (Klink; Machado, 2005).

A crescente demanda por restauração de ecossistemas em larga escala é amplamente reconhecida como uma estratégia fundamental para mitigar a mudança climática global. No cenário internacional, o Brasil assumiu o compromisso de restaurar 12 milhões de hectares no âmbito do Acordo de Paris (Fernandes et al., 2018). Em nível nacional, destaca-se o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg), que visa recuperar pelo menos 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030. Essa meta prioriza a recuperação de áreas de preservação permanente (APP), reservas legais (RL) e áreas degradadas com baixa produtividade (PLANAVEG, 2017, Mendes et al., 2024).

Áreas de restauração são locais que foram degradados por atividades humanas ou processos naturais e que estão sendo recuperados com o objetivo de restabelecer suas características ecológicas originais. Esse processo visa não apenas a recuperação da vegetação nativa, mas também a reabilitação das funções ecológicas, como a conservação da água e a proteção da biodiversidade, buscando restituir os serviços ecossistêmicos em uma área degradada ou alterada ao nível mais próximo do estado pré-distúrbio (Gastauer et al., 2018).

A Organização das Nações Unidas (ONU) adota a terminologia Restauração de Ecossistemas, amplamente aceito pela comunidade internacional:

¹ Artigo publicado nos Anais do XX Simpósio Brasileiro de Geografia Física e Aplicada (SBGFA) 2024.

A restauração de ecossistemas significa ajudar na recuperação de ecossistemas que foram degradados ou destruídos, bem como conservar os ecossistemas que ainda estão intactos. Ecossistemas mais saudáveis, com maior riqueza na biodiversidade, produzem mais benefícios, como solos mais férteis, maior produtividade nas áreas de madeira e pesca, e maiores estoques de gases de efeito estufa.

O Projeto Araticum - Articulação pela restauração do Cerrado é uma iniciativa dedicada à restauração ecológica do bioma Cerrado, visando combater a degradação ambiental e promover o desenvolvimento sustentável nas regiões onde atua. O projeto se destaca pela integração das comunidades locais em todas as etapas do processo de restauração, desde a coleta de sementes até o plantio e a manutenção das áreas recuperadas.

A plataforma associada ao Projeto Araticum (<https://araticum.lapig.iesa.ufg.br>) disponibiliza uma vasta gama de dados sobre as ações de restauração, permitindo a consulta e análise de informações em níveis municipal, estadual e de bacias hidrográficas. A plataforma também promove a transparência e a colaboração entre os diversos atores envolvidos, contribuindo para o fortalecimento da cadeia de restauração ecológica no Cerrado e para a replicação de modelos de sucesso em outras áreas do bioma (Araticum, 2024).

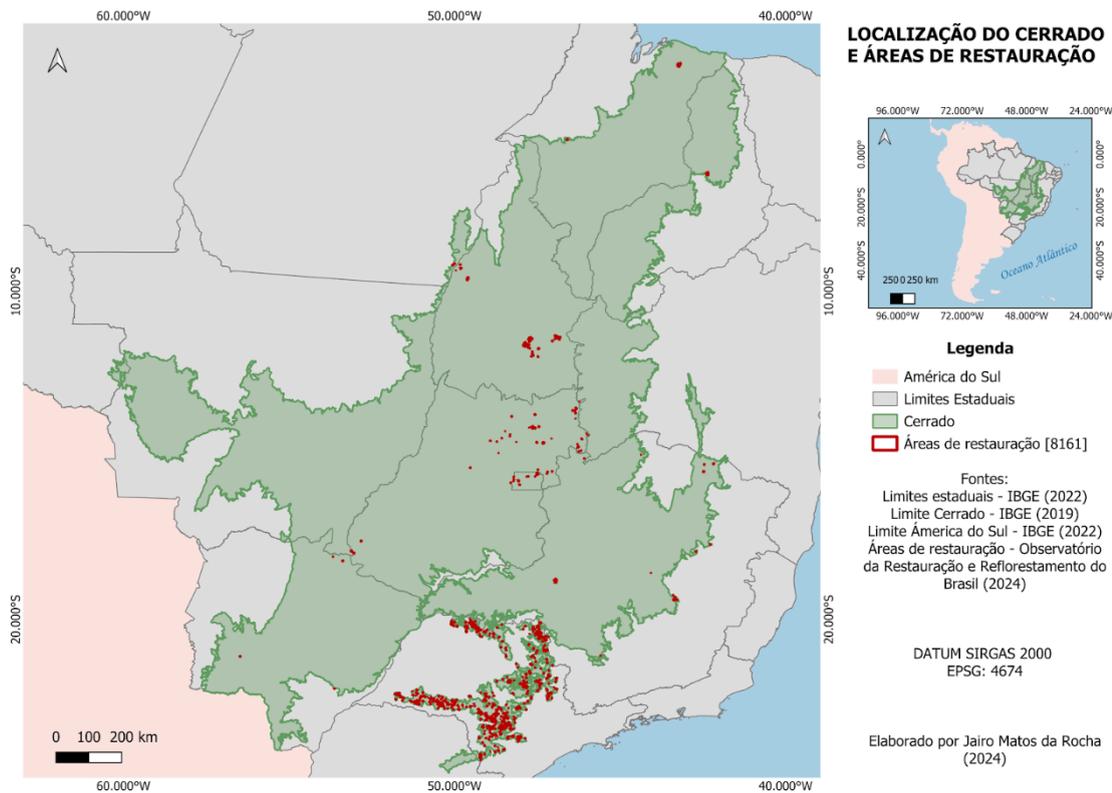
Diante disto, o objetivo deste trabalho é caracterizar espacialmente as áreas de restauração do Cerrado disponibilizadas na Plataforma Araticum. A análise busca fornecer uma visão detalhada sobre as iniciativas de recuperação ambiental em andamento, destacando a importância dessas áreas para a conservação e o desenvolvimento sustentável deste bioma.

Área de Estudo

A área de análise é o Bioma Cerrado, que abrange aproximadamente 2 milhões de quilômetros quadrados, correspondendo a cerca de 22% do território brasileiro. Este bioma, localizado na região central do Brasil, estende-se por 12 estados: Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, São Paulo, Paraná, Rondônia, além do Distrito Federal (Figura 8).

Conhecido por sua imensa biodiversidade e por ser um dos 36 hotspots mundiais de biodiversidade, o Cerrado desempenha um papel fundamental na manutenção dos ciclos hidrológicos e climáticos, além de ser o berço de várias nascentes de bacias hidrográficas importantes, como as dos rios São Francisco, Tocantins-Araguaia e Paraná.

Figura 8 - Mapa de localização do Cerrado e das áreas de restauração.



Fonte: Autoria própria (2024).

Procedimentos metodológicos

A metodologia utilizada nesta pesquisa se deu por meio da utilização de bibliotecas abertas da linguagem de programação Python (Pandas, Geopandas e Geohash), visando interatividade e fácil replicação. Com a interface *Google Collaboratory* foi possível organizar, corrigir e extrair informações sobre todas as áreas de restauração enviadas para a Rede Araticum até o mês de agosto de 2024.

Inicialmente, foi realizada uma verificação da validade dos polígonos, isto é, identificar se havia falhas nos desenhos, buracos, *self-intersection* etc. O segundo procedimento foi avaliar o tamanho mínimo que as áreas deveriam possuir para que fossem consideradas geometrias reais de restauração, com área mínima de 0,10 hectares, estabelecido pela Força Tarefa do Observatório da Restauração e Reflorestamento (ORR). Após estas verificações, foi possível gerar o cálculo de área em hectares com base no sistema de projeção de coordenadas policônico de Albers (EPSG: 5880).

Além da área individual dos polígonos, se observou a representatividade das geometrias em relação às unidades federativas, às quais pertencem e em relação ao bioma

Cerrado. Os procedimentos descritos para geração dos gráficos de forma automatizada (usando a interface do *Google Colab*) estão disponíveis no link a seguir: <https://github.com/jairomr/caracterizacao-araticum-2024>.

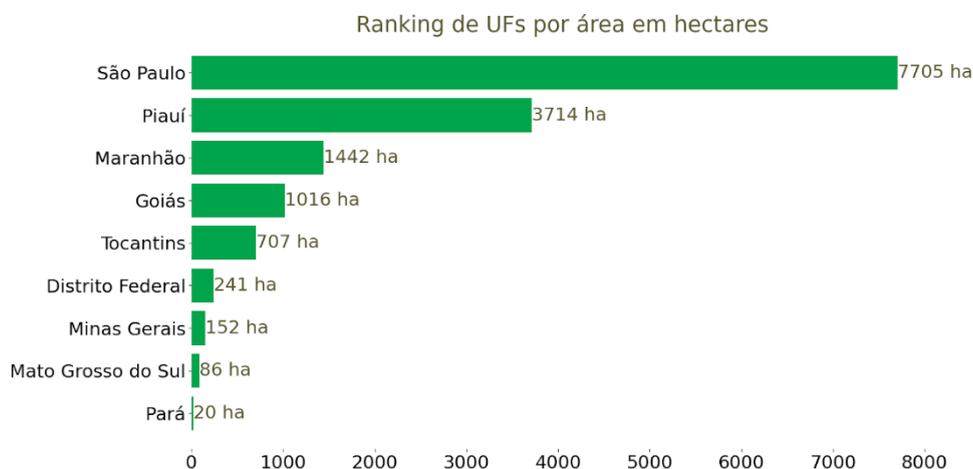
Resultados e Discussão

Os dados apresentados na Figura 2 revelam a distribuição das áreas de restauração cadastradas nas unidades federativas do Bioma Cerrado. São Paulo destaca-se como a unidade federativa com a maior extensão de áreas em recuperação, totalizando 7.705 hectares, o que reflete a intensa mobilização e esforços de restauração ecológica no estado (Figura 9). Em segundo lugar, o Piauí apresenta 3.714 hectares de áreas restauradas, seguindo por Maranhão e Goiás, com 1.442 e 1.026 hectares, respectivamente, mostrando a relevância de iniciativas para a conservação ambiental nas regiões.

Tocantins, apesar de ter um número elevado de áreas cadastradas, possui uma extensão de 707 hectares em processo de restauração, demonstrando um contraste entre o número de polígonos e a área total restaurada. O Distrito Federal e Minas Gerais aparecem com 241 e 152 hectares, respectivamente, indicando esforços mais modestos, mas ainda importantes para a recuperação ecológica.

Mato Grosso do Sul e Pará, com 86 e 20 hectares, respectivamente, representam as unidades federativas com menor participação no total de áreas restauradas, o que pode sugerir a necessidade de intensificação das ações de restauração nessas regiões. Esses dados evidenciam a diversidade de esforços e a importância de continuar incentivando e ampliando as iniciativas de restauração no Cerrado.

Figura 9 - Ranking das áreas de restauração nas unidades federativas localizados no Bioma Cerrado, até agosto de 2024.

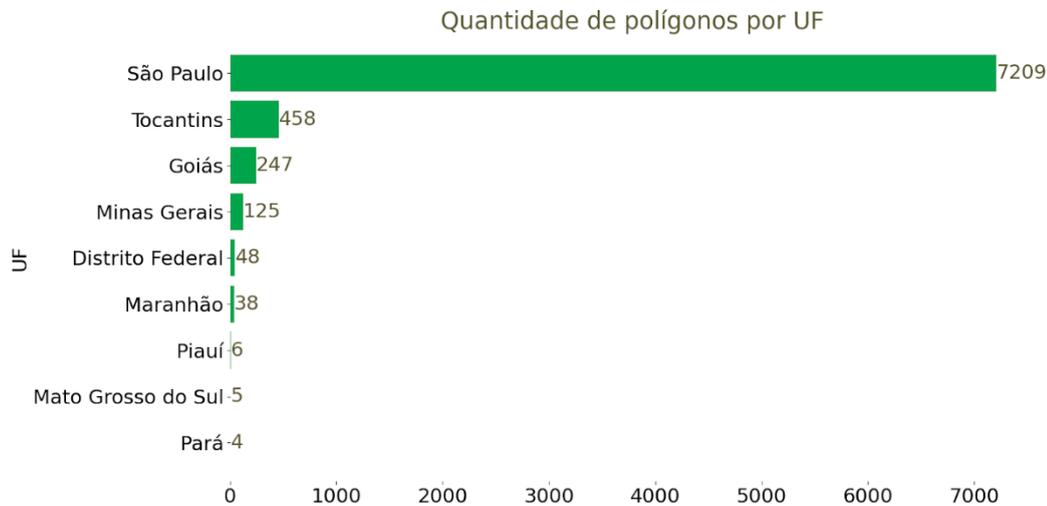


Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 10 mostra que São Paulo lidera em número de áreas cadastradas, totalizando 7.209, o que demonstra a ampla cobertura e a intensidade das iniciativas de restauração. Isso sugere que os esforços do SARE (Sistema de Apoio à Restauração Ecológica), desenvolvido pelo governo estadual para cadastrar e monitorar as áreas de restauração, estão sendo eficazes.

Tocantins, com 458 áreas cadastradas, e Goiás, com 247, seguem na sequência, indicando um esforço significativo, mas ainda menor em comparação com São Paulo. O número de áreas cadastradas é bastante reduzido em estados como Piauí, Mato Grosso do Sul e Pará, que apresentam apenas 6, 5 e 4 áreas cadastradas, respectivamente, sugerindo uma menor mobilização para a restauração em comparação com outros estados.

Figura 10 - Quantidade de áreas (polígonos) cadastrados pelas unidades federativas, até agosto de 2024.

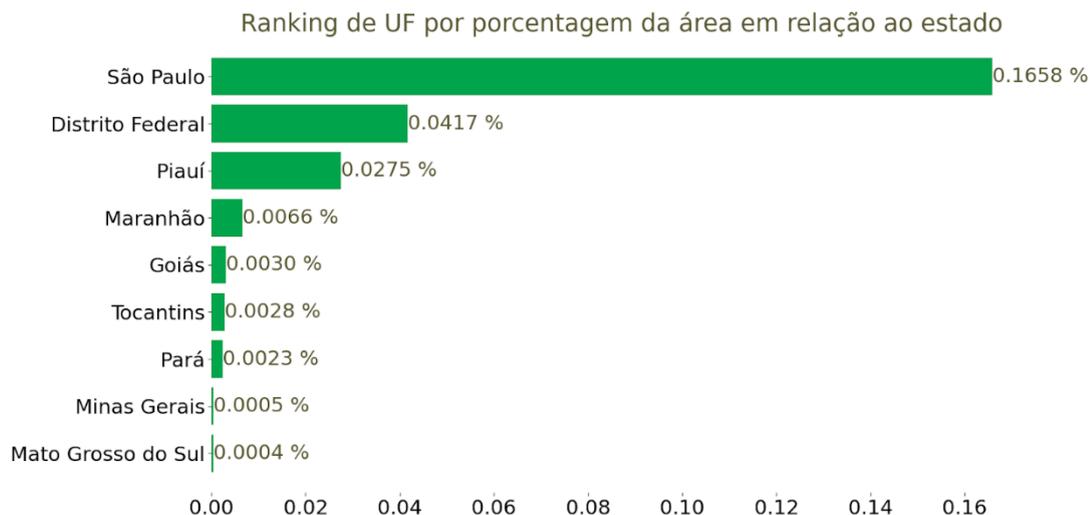


Fonte: Autoria própria (2024).

Analisando os mesmos dados, agora em relação à porcentagem da área restaurada em relação ao tamanho total de cada estado, São Paulo novamente se destaca com a maior porcentagem de 0,1658%, indicando que a restauração representa uma parte considerável da área total deste estado. O Distrito Federal, com 0,0417%, e o Piauí, com 0,0275%, têm proporções significativas considerando o tamanho reduzido de seus territórios.

Em contraste, estados como Goiás e Tocantins, com porcentagens de 0,0030% e 0,0028%, apresentam uma proporção menor de área restaurada em relação à sua extensão total. Pará, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul possuem as menores porcentagens, refletindo a necessidade de intensificação das iniciativas de restauração para alcançar um impacto mais significativo (Figura 11). Esses dados sublinham a importância de balancear os esforços de restauração para cobrir tanto a quantidade de áreas quanto a proporção do território, garantindo uma recuperação ambiental eficaz no Bioma Cerrado.

Figura 11 - Percentual de Área Restaurada em Relação à Área Total de Cada Unidade Federativa no Bioma Cerrado, até agosto de 2024.



Fonte: Autoria própria (2024).

Destaca-se que as iniciativas de restauração estão concentradas em 9 dos 12 estados abrangidos pelo Bioma Cerrado. Além dessa concentração geográfica, observa-se que, apesar do registro de 8.161 polígonos de restauração, a extensão total dessas áreas não cobre nem 1% do território do Cerrado. Esse cenário evidencia uma distribuição desigual dos esforços de recuperação e sugere a necessidade de expandir as iniciativas de restauração para uma cobertura mais abrangente do bioma.

Considerações Finais

O estudo sobre a caracterização das áreas de restauração do Cerrado, disponíveis na Plataforma Araticum, evidencia a importância crescente da restauração ecológica como uma estratégia central para a conservação da biodiversidade e a mitigação das mudanças climáticas. O Cerrado, um bioma de imensa riqueza ecológica e um dos principais hotspots de biodiversidade no mundo, enfrenta sérios desafios devido à expansão agrícola e à degradação ambiental.

A análise das áreas de restauração revelou um esforço significativo em unidades federativas como São Paulo, que lidera tanto em extensão quanto em número de áreas cadastradas. No entanto, observou-se uma distribuição desigual desses esforços, com algumas regiões apresentando menor mobilização para a restauração. Esta disparidade sugere a

necessidade de políticas e incentivos que promovam uma maior equidade na alocação de recursos e na implementação de projetos de restauração em todo o bioma.

Em conclusão, a continuidade e ampliação das iniciativas de restauração são essenciais para reverter a degradação do Cerrado, preservar sua biodiversidade e garantir a provisão de serviços ecossistêmicos vitais. É imperativo que as políticas públicas, a colaboração entre os diversos atores e a alocação adequada de recursos sejam intensificadas, para se alcançar uma recuperação ambiental eficaz e duradoura no Cerrado.

4.2 MONITORAMENTO DE RESTAURAÇÃO NO CERRADO USANDO SENSORIAMENTO REMOTO²

Introdução

O Cerrado é um dos biomas mais ricos em biodiversidade no mundo, abrigando cerca de 5% de todas as espécies conhecidas, muitas delas endêmicas, ou seja, não encontradas em nenhum outro lugar do planeta (Klink; Machado, 2005; Sawyer *et al.*, 2018). Apesar de sua importância ecológica, o Cerrado é também um dos biomas mais ameaçados pelo avanço das atividades humanas, como o desmatamento, a agropecuária e a expansão urbana (Coelho *et al.*, 2020; Grecchi *et al.*, 2014; Rodrigues *et al.*, 2022). Estima-se que mais de 50% de sua vegetação original já tenha sido destruída (Strassburg *et al.*, 2017), trazendo consequências como o aumento de temperatura e a diminuição da umidade do ar, se associando, ainda, a alterações nos padrões sazonais de chuva do bioma (Coe *et al.*, 2017; Hofmann *et al.*, 2021; Barbosa, 2019}.

A restauração ecológica do Cerrado é fundamental para a manutenção dos serviços ecossistêmicos que ele oferece, como a regulação do ciclo hidrológico, a conservação do solo e o sequestro de carbono (Ortolan, 2024). Contudo, o acompanhamento e monitoramento dessas ações de restauração podem ser desafiadores devido à extensão territorial e aos custos envolvidos (Cisneros-Araujo *et al.*, 2021; Jia *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o sensoriamento remoto surge como uma ferramenta promissora, permitindo a avaliação em larga escala e a longo prazo das áreas restauradas de forma mais econômica e eficiente (Chen *et al.*, 2023; Cisneros-Araujo *et al.*, 2021; Kowe; Mutanga; Dube, 2021). O uso de tecnologias de sensoriamento remoto, como imagens de satélite, possibilita a análise precisa de mudanças na cobertura vegetal e na saúde do ecossistema, facilitando a identificação de áreas que necessitam de intervenções adicionais e a avaliação do progresso da restauração (Souza *et al.*, 2020; Jia *et al.*, 2023). Essas ferramentas se destacam como uma solução acessível e inovadora para apoiar as iniciativas de restauração, promovendo o desenvolvimento sustentável no bioma Cerrado (Scavanaca *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022).

Desta maneira, este artigo tem como objetivo desenvolver uma metodologia *open-source* que possibilite a classificação de áreas de restauração no Cerrado, fomentando análises e o acompanhamento das áreas de restauração declaradas em seu território.

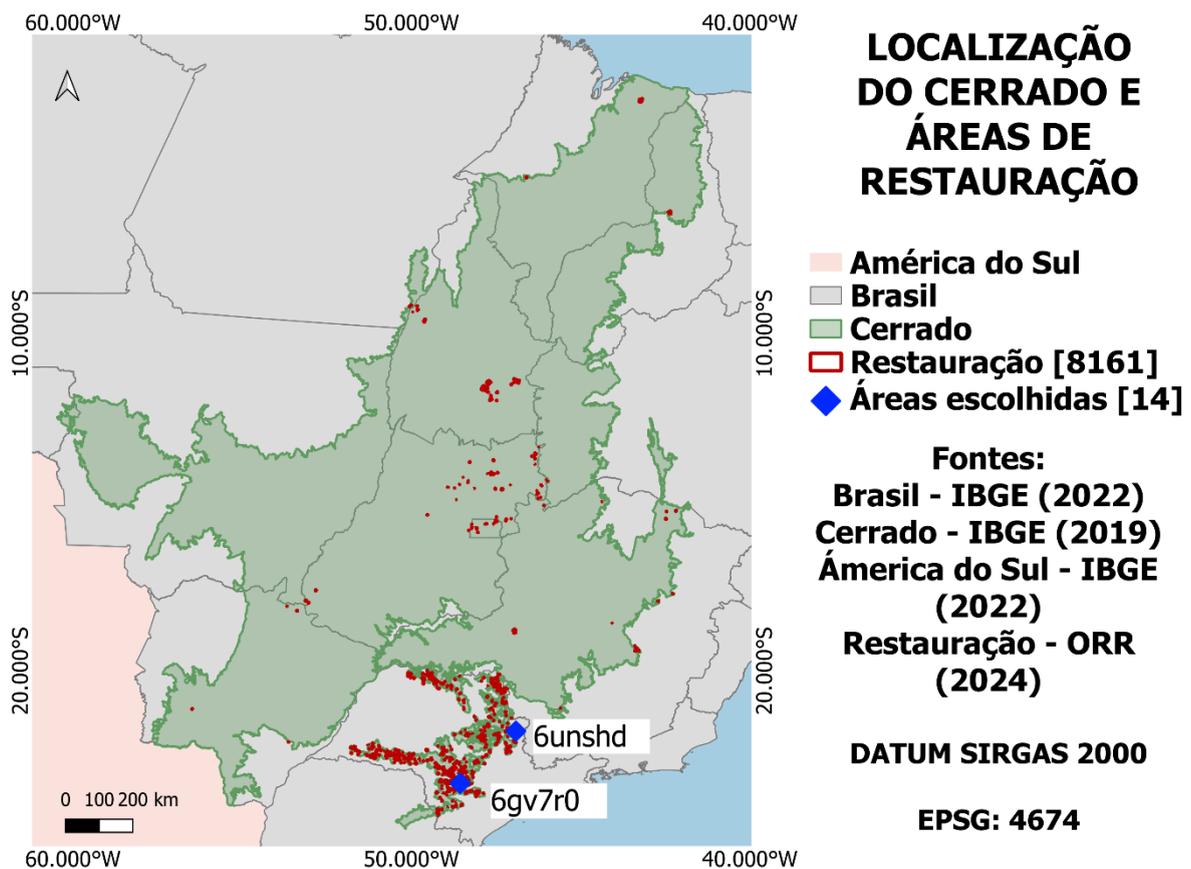
² Artigo a ser publicado nos Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR) 2025.

Material e Métodos

Área de Estudo

As áreas de estudo estão localizadas no Bioma Cerrado e incluem 14 das 8161 áreas de restauração disponibilizadas pela Rede Araticum e pelo Observatório da Restauração e Reforestamento (ORR) em 2024 <https://araticum.lapig.iesa.ufg.br>; <https://observatoriodarestauracao.org.br>. O estudo identificou e classificou 15 agrupamentos de polígonos retangulares com ~74,42 ha cada, sendo que cada polígono contém uma quantidade de áreas de restauração variável. Dentre os 15 agrupamentos, dois foram selecionados (denominados 6unshd e 6gv7r0), para análise, contando com 14 polígonos de restauração no total (Figura 12)

Figura 12 - Áreas de restauração selecionadas a partir das áreas da Rede Araticum e do ORR. São 14 áreas (em azul).

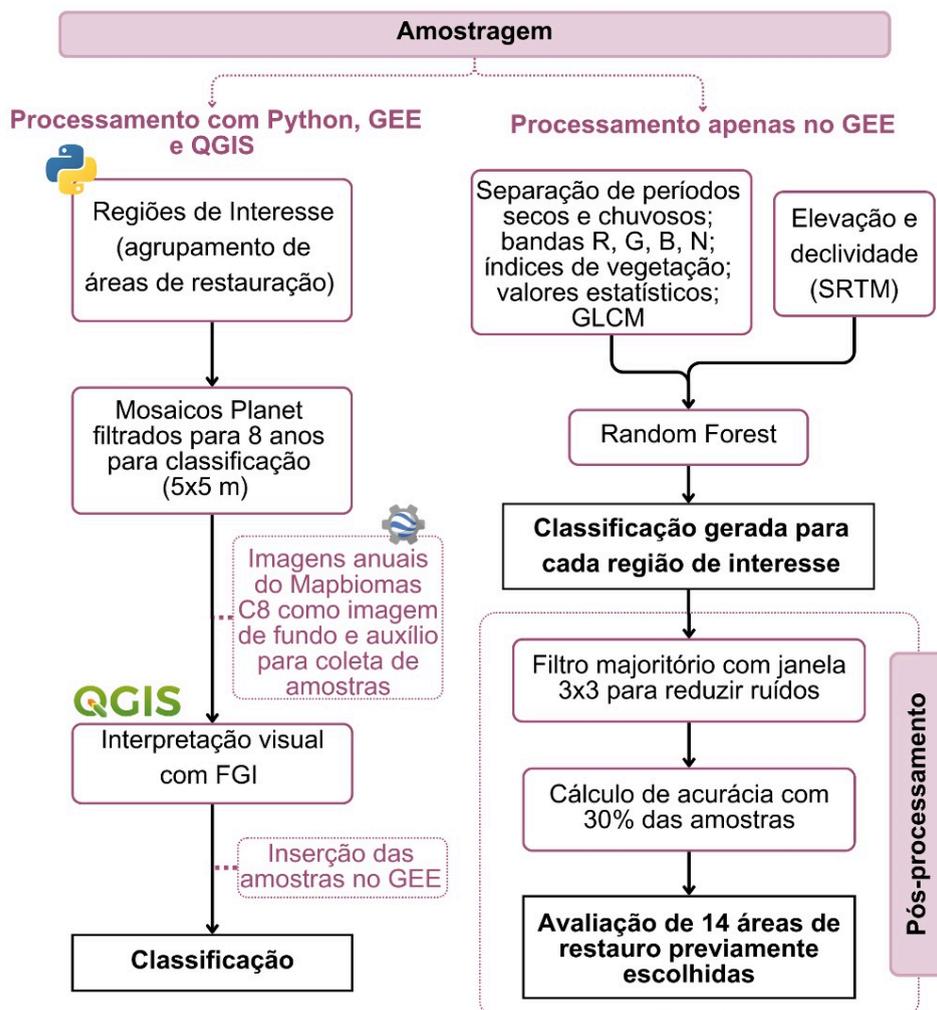


Fonte: Autoria própria (2024).

Análise das áreas de restauração

A análise das áreas de restauração (Figura 13) foi realizada por meio de uma classificação supervisionada no *Google Earth Engine* (GEE), utilizando mosaicos de imagens do satélite *Planet* com resolução espacial de 4,77 m. Esse nível de detalhe permitiu uma análise precisa de áreas de aproximadamente um hectare.

Figura 13 - Fluxograma da metodologia desenvolvida no estudo.



Fonte: Autoria própria (2024).

Para a classificação de uso e cobertura da terra do ano de 2023 foram utilizadas diversas bandas auxiliares, como os mosaicos anuais da Planet dos últimos oito anos para garantir uma avaliação multitemporal consistente (Li et al., 2023). O algoritmo Random

Forest foi o método de classificação selecionado devido à sua robustez no tratamento de superfícies heterogêneas e pela capacidade de integrar diversas fontes de dados (Mahdianpari et al., 2017; Xia et al., 2017), mantendo alta acurácia (Wang *et al.*, 2023). As amostragens espectrais foram feitas por meio do software QGIS, com uma versão personalizada do plugin *Fast Grid Inspection* - FGI, desenvolvido pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG; <https://github.com/lapig-ufg/qgis-fgi-plugin>; <https://github.com/lapig-ufg/qgis-fgi-plugin>)

Foram empregadas bandas espectrais (azul, verde, vermelho, infravermelho próximo) e índices de vegetação (NDVI, EVI, SAVI, GLI, EXG) (Rouse, 1974; (Huete, 1988; Liu; Huete, 2019; Louhaichi; Borman; Johnson, 2001; Rouse *et al.*, 1974; Woebbecke *et al.*, 1995), organizados em períodos sazonais para captar a dinâmica característica do Cerrado. Adicionalmente, foram incorporadas características texturais derivadas da Matriz de Co-Ocorrência de Níveis de Cinza (GLCM) (IQBAL et al., 2021), bem como dados de elevação e declividade obtidos do modelo digital de elevação da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

A classificação resultou em 19 classes de uso e cobertura da terra, baseadas nas categorias do MapBiomas (MapBiomas, 2022). Após a classificação, foi aplicado um filtro majoritário (3x3) para reduzir ruídos e suavizar os resultados (Dong *et al.*, 2006).

A validação dos resultados foi realizada com base em pontos de controle, divididos em conjuntos de treinamento (70%) e teste (30%). A acurácia do modelo foi avaliada por meio do índice Kappa e da matriz de confusão. Além disso, foram realizadas comparações entre o mapa de classificação gerado e o do MapBiomas (coleção 8), bem como o mosaico *Planet* utilizado como base da classificação: a) comparação visual e b) comparação pelo gráfico de Sankey para ilustrar as transições entre as classes do MapBiomas e aquelas identificadas no presente estudo.

Resultados e Discussão

O primeiro agrupamento ($6gv7r0^3$), com oito áreas de restauração, destaca-se pela precisão na identificação das classes de uso do solo. A classe de Áreas Alagáveis (Figura 14 A) não aparece na *Planet*, demonstrando solo exposto e formações florestais na área. Formação Florestal e Silvicultura ocupam, respectivamente, 53,63% e 15,33% da área

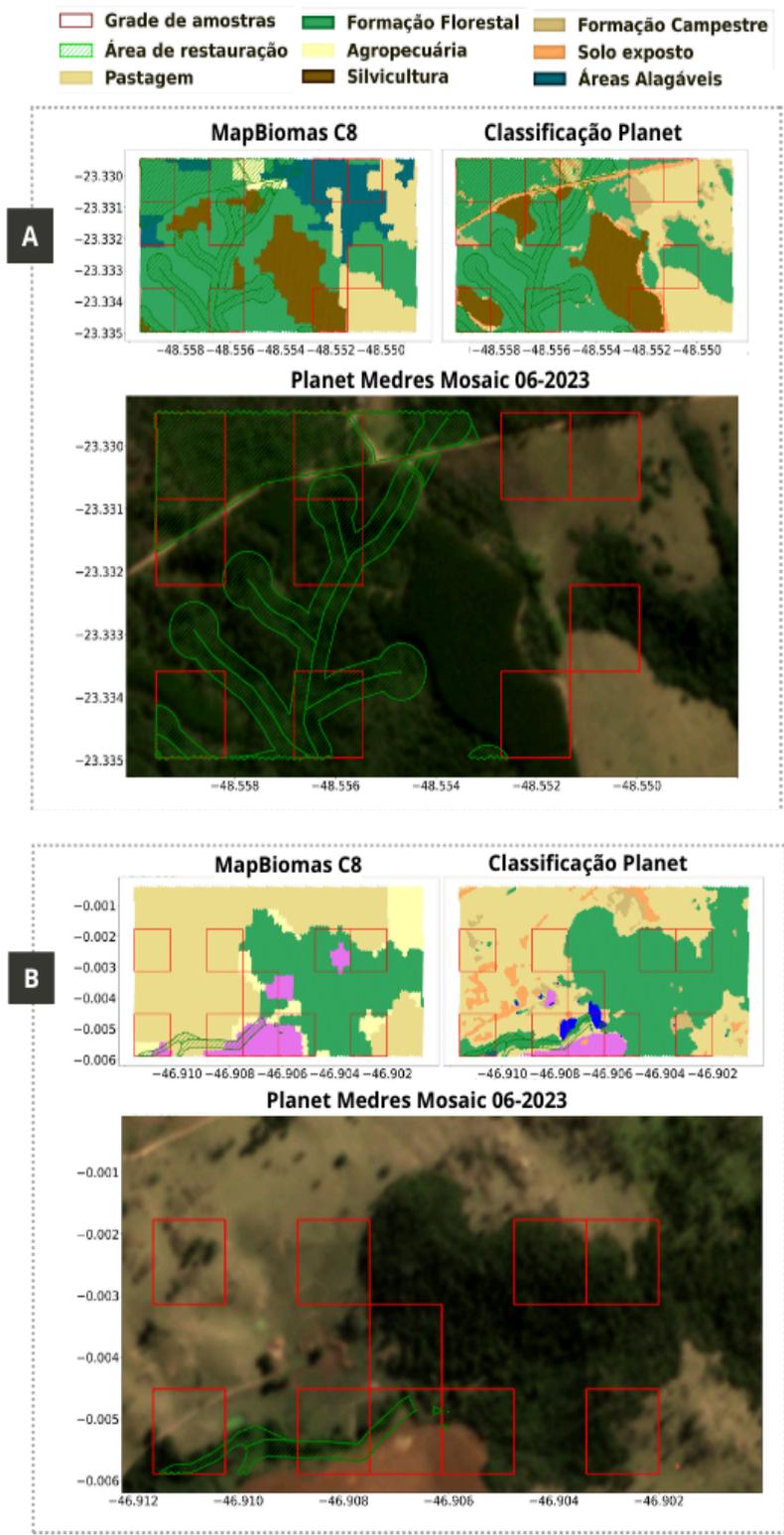
³ Este código foi gerado pelo algoritmo *GeoHash* e corresponde a um polígono retangular de aproximadamente 74,42 hectares. Dentro dessa área, há vários polígonos de restauração declarados, que foram classificados para a pesquisa.

segundo o MapBiomias (C8), e 54,05% e 16,09% na Classificação Planet. A precisão do modelo de classificação ao identificar essas áreas é notável, com pastagens representando 14,34% (MapBiomias) e 20,22% (*Planet*). Esses resultados demonstram a capacidade do modelo *Random Forest* em segmentar as classes com exatidão.

Já no segundo agrupamento (*6unshd⁴*), com seis áreas, a Figura 14 B evidencia um desafio metodológico: a confusão entre áreas de água e sombra. Esses valores ressaltam a necessidade de ajustes na classificação para lidar com casos de sombra em áreas aquáticas, uma limitação encontrada na metodologia. Nesta área, a classe Pastagem aparece como a mais representativa, ocupando 53,92% segundo MapBiomias e 45,34% na Classificação Planet. A Formação Florestal cobre 29,11% (MapBiomias) e 42,10% (Planet), enquanto as áreas de Solo Exposto apresentam uma discrepância menor entre os dois métodos: 4,90% e 3,29%.

⁴ Este código foi gerado pelo algoritmo *GeoHash* e corresponde a um polígono retangular de aproximadamente 74,42 hectares. Dentro dessa área, há vários polígonos de restauração declarados, que foram classificados para a pesquisa.

Figura 14 - Classificação dos agrupamentos com diversos polígonos, destacando pastagem e solo exposto no grupo *6gv7r0* (A), e destacando a identificação de água pela *Planet* em locais de sombra no grupo *6unshd* (B).



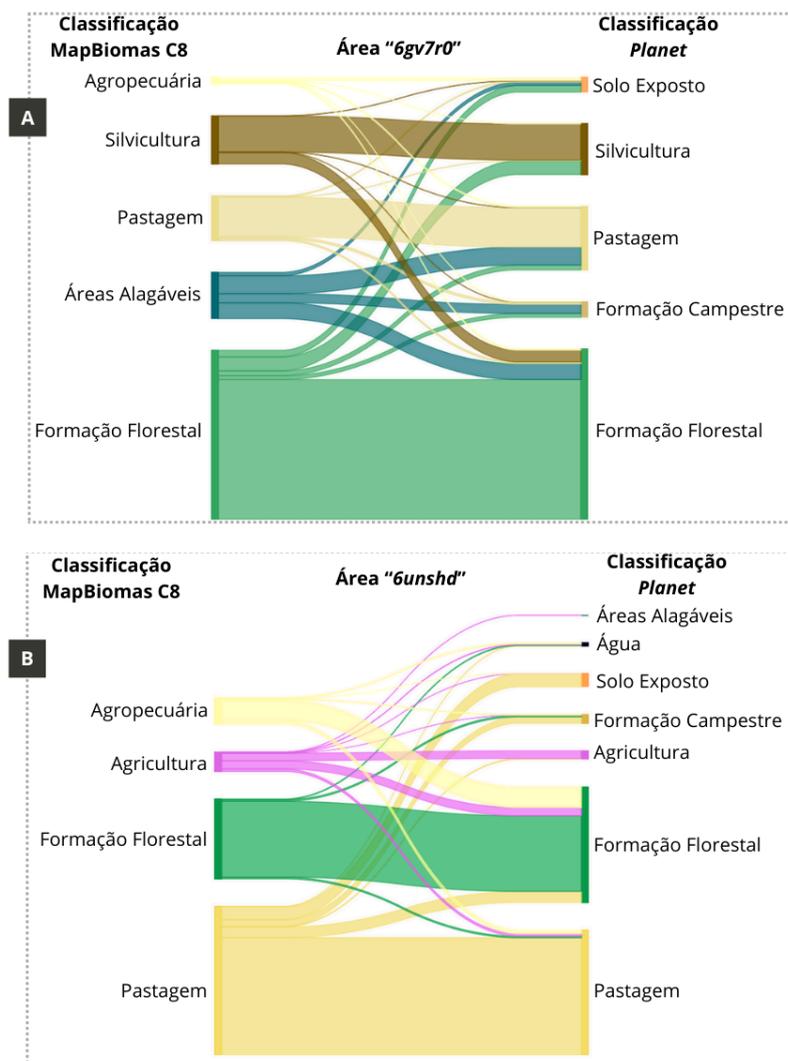
Fonte: Autoria própria (2024).

Complementando essa análise, o diagrama de Sankey (Figura 15A) mostra as transições entre as classes de uso do solo. Observa-se que a maioria das transições ocorre entre áreas de pastagem e solo exposto, reforçando a precisão da classificação e a importância

do monitoramento contínuo para observar mudanças e estabelecer prioridades para futuras ações de restauração.

O diagrama de Sankey (Figura 15 B) para o agrupamento *6unshd* também ilustra as transições de uso do solo, indicando que a maior parte das trocas ocorre entre Pastagem, Formação Florestal e Solo Exposto. Essas transições evidenciam a dinâmica de mudança de uso do solo na área, reforçando a importância do monitoramento contínuo para validar o desenvolvimento da restauração.

Figura 15- Diagrama de Sankey evidenciando as transições de classes de uso do solo para o agrupamento *6gv7r0* (A) e *6unshd* (B).



Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados médios de acurácia e índice Kappa indicam que a metodologia proposta é eficaz para identificar diversos usos com detalhamento, destacando a importância de boas

coletas amostrais. O índice Kappa médio das 14 áreas foi de 0,78 e a acurácia geral da classificação ficou em torno de 80%.

Conclusões

A metodologia *open-source* utilizando sensoriamento remoto mostrou-se promissora para o monitoramento de áreas de restauração no Cerrado. A classificação de imagens de satélite com o algoritmo *Random Forest* no *Google Earth Engine* permitiu identificar as feições naturais, como savana e vegetação herbácea com mais detalhes, demonstrando a viabilidade da abordagem proposta. No entanto, é fundamental considerar cuidadosamente as amostragens durante o processo de classificação. Uma técnica bem executada, que capture uma ampla variedade de feições ambientais, permitirá distinguir de forma mais precisa entre a vegetação em regeneração e outras formas de cobertura, como pastagens.

Além disso, a metodologia demonstrou ser escalável, com potencial de aplicação em todos os polígonos de restauração do Cerrado. Isso indica que, com as devidas adaptações, ela pode ser replicada em outros biomas, desde que se leve em conta as dinâmicas territoriais e climáticas específicas de cada região. Também se aponta a possibilidade de utilização deste *workflow* como uma ferramenta estratégica para orientar decisões em coletivos de restauração. Ao indicar tanto as áreas que apresentam sinais de recuperação quanto aquelas que demandam maior intervenção, o método permitiria direcionar os esforços de campo de maneira mais assertiva e econômica.

4.3 RELATÓRIOS E SCRIPTS GERADOS NA PESQUISA

4.3.1 Relatório de classificação do uso do solo

O primeiro relatório gerado é o resumo dos resultados de classificação do uso do solo e da organização dos dados do MapBiomass. Ele se mostra intuitivo e visualmente amigável ao usuário. Todo relatório testado e gerado contém a avaliação do uso do solo de cada geometria com mapas e gráficos para apoio visual. Os relatórios desenvolvidos neste modelo estão disponíveis no link interativo <https://mestrado-araticum-fe22be80649f.herokuapp.com/>.

No primeiro momento de utilização do código de geração do relatório, a saída se dá por uma página com o título de nomeação e, logo abaixo, uma tabela com título de indicação para todos os relatórios gerados e disponibilizados pelo usuário (Figura 16). Além disso, a tabela está organizada conforme a categoria do polígono (restauração ou reflorestamento), se o que foi avaliado faz ou não parte de um projeto e, se sim, logo em seguida é colocado o nome do projeto; caso não seja um projeto, as células tanto de projeto quanto de nome do projeto são marcadas como “Não identificado”.

A tabela também indica as porcentagens de uso do solo, divididas em natural e antrópico, o que facilita a observação de áreas que possam ter algum problema (mais de 51% do seu uso sendo identificado como antrópico). Após a identificação geral do relatório, na última coluna, se encontra um link de acesso para o próprio relatório que abrirá em uma nova página.

Figura 16 - Página de saída contendo todos os relatórios gerados e disponibilizados automaticamente pelo usuário.

Lista de Relatórios de Análise Geométrica

Listagem e acesso aos relatórios de análise comparativa de formas, padrões geométricos e uso do solo.

Relatórios Disponíveis

10 resultados por página Pesquisar

ID	CATEGORIA	PROJETO	NOME DO PROJETO	NATURAL	ANTROPICO	AÇÕES
9	Restauração	sim	Corredor de Biodiversidade do Araguaia	4.04%	95.96%	Ver Relatório
0	restauracao	sim	Food Products from the Forests in the Cerrado, ...	4.42%	95.58%	Ver Relatório
1	Restauração	sim	Corredor de Biodiversidade do Araguaia	6.60%	93.40%	Ver Relatório
14	restauracao	Não identificado	Não identificado	11.76%	88.24%	Ver Relatório
2	Restauração	sim	Corredor de Biodiversidade do Araguaia	14.53%	85.47%	Ver Relatório
6	Restauração	sim	Corredor de Biodiversidade do Araguaia	18.56%	81.44%	Ver Relatório
3	restauracao	sim	Fortalecer Cadeias Sociobioprodutivas em Rede B...	19.06%	80.94%	Ver Relatório
7	Restauração	sim	Corredor de Biodiversidade do Araguaia	24.44%	75.56%	Ver Relatório
12	restauracao	Não identificado	Não identificado	60.00%	40.00%	Ver Relatório
16	restauracao	Não identificado	Não identificado	70.97%	29.03%	Ver Relatório

Mostrando de 1 até 10 de 22 registros Anterior 2 3 Próximo

Assim que aberta a nova página, são encontradas todas as análises executadas sobre o polígono alvo geradas automaticamente (Figura 17). Conforme a Figura 17, em ordem, estão disponibilizadas: imagem de referência composta pelo contorno do polígono sobreposto a uma imagem gratuita do *Google Maps*, de alta resolução, para ilustração do contexto da área; imagem de classificação de uso do solo desenvolvida com os mosaicos *Planet*, para o ano de 2023, ao lado da referência, com legenda da porcentagem de ocupação de cada classe identificada dentro do polígono; dados do projeto (instituição executora, método de restauração, se há ou não monitoramento), caso seja um projeto; imagens *Planet* e classificação do MapBiomas em diferentes anos para comparação histórica, considerando o ano de início da restauração e o último ano de classificação; e, por fim, uma série temporal do uso do solo dentro do polígono desde 1985 até o último ano de classificação disponível também pelo MapBiomas. Os relatórios podem ser acessados, na íntegra, em:

Figura 17 - Relatório automatizado de análise geométrica para polígonos considerados como área de restauração. A página consta com uma imagem de referência e uma de classificação do uso do solo, bem como a distribuição das classes identificadas em seu interior. Ainda, é listada toda a informação disponibilizada sobre o polígono...

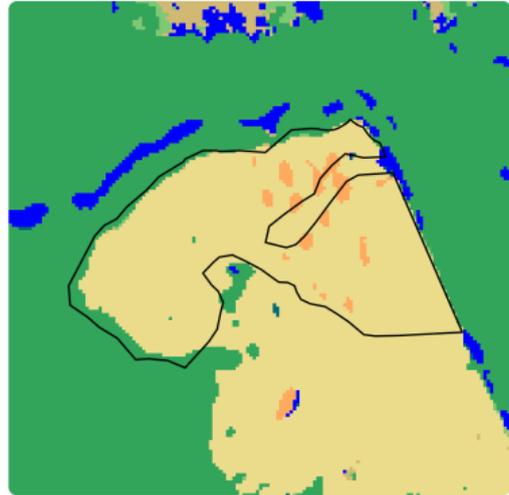
Relatório de Análise Geométrica

Análise comparativa de formas, padrões geométricos e uso do solo

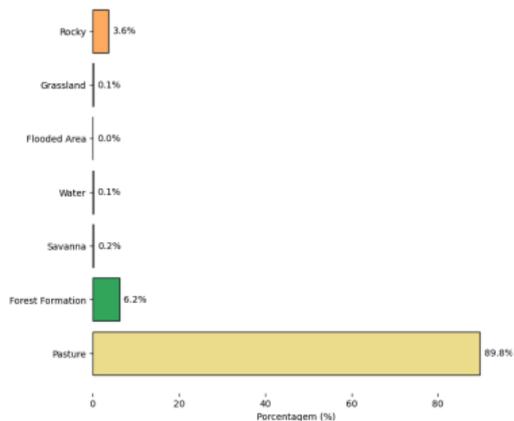
Referência



Classificação Uso de Solo 2023



Distribuição de Classes (%) dentro da Geometria



Classes de uso do solo em porcentagem para geometria

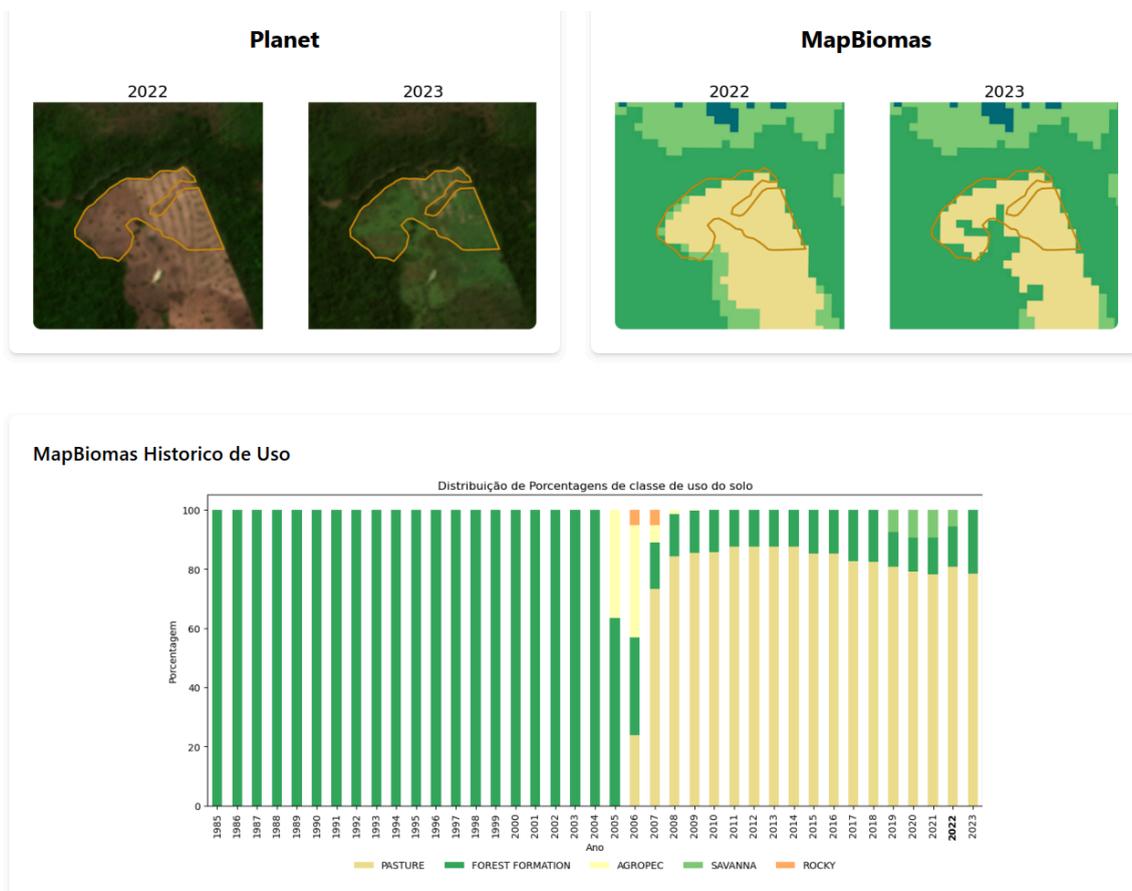
Dados do Projeto

Categoria: Restauração
Fonte: Black Jaguar Foundation
Projeto: sim
Nome do Projeto: Corredor de Biodiversidade do Araguaia
Instituição Executora: Black Jaguar Foundation
Instituição Gestora: Não identificado
Instituição Financiadora: Doadores da Black Jaguar

Método Principal: plantio de mudas
Método Combinado: Não identificado
Motivação: adequacao ambiental
Tipo de Área: Reserva Legal - RL
Data de Início: 10/1/2022
Projeto Ativo: sim
Data de Conclusão: None

Link: [Link](#)
Área (Ha): 10.2929102608
Monitoramento: sim
Privacidade: publico

Figura 17 - ... continuação. Ao final, histórico de uso do solo de acordo com imagens Planet e classificação do Projeto MapBiomias, bem como as mudanças no uso a partir de 1985.

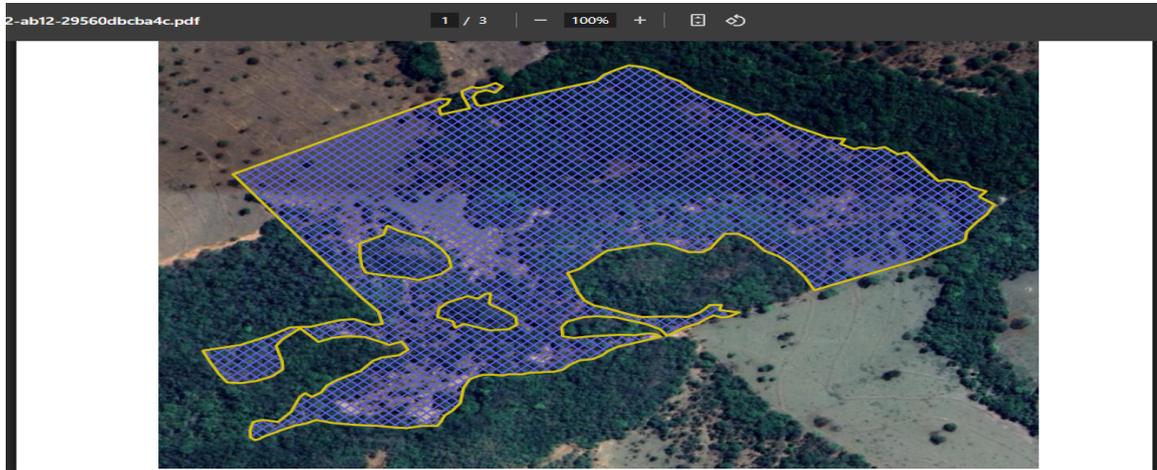


Fonte: Autoria própria (2025).

4.3.2 Relatório de polígonos conflitantes

O segundo relatório desenvolvido, e exemplificado abaixo, é referente à demonstração dos conflitos de polígonos visualmente. No exemplo a seguir, a primeira página apresenta duas restaurações distintas que se intersectam, a primeira com o preenchimento azul e a outra com representação da borda em amarelo (Figura 18).

Figura 18 - Relatório automatizado de análise de sobreposição e conflitos entre polígonos de restauração. Abaixo, dois polígonos conflitantes: ao longo de todas as margens na cor amarela está um polígono único com ‘buracos’ (formas redondas apresentadas em amarelo) e o segundo polígono é toda a área ilustrada em pelas grades em azul.

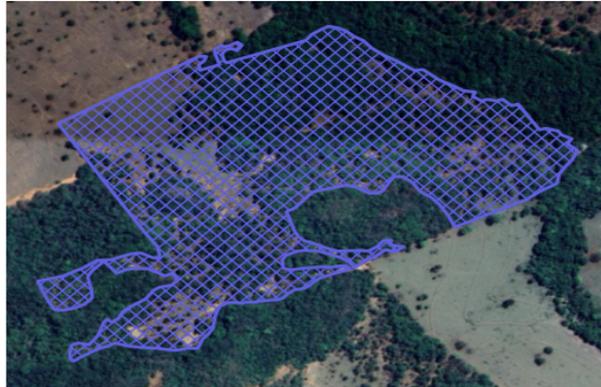


Fonte: Autoria própria (2025).

A segunda página demonstra os detalhes da área de restauração em azul, como a instituição executora de restauração, a instituição gestora e financiadora, além da data de início das atividades e data prevista para encerramento. Os códigos que aparecem são referentes à padronização desenvolvida no âmbito do Observatório da Restauração e Reflorestamento (ORR)⁵ e a terceira página apresenta os metadados da restauração em amarelo, seguindo o mesmo padrão da página anterior.

⁵ O ORR conta com um banco de dados unificado, desenvolvido em 2024. Devido a isto, os códigos se apresentam como três letras e dois números, a exemplo: 'pro00'.

Figura 19 - Primeira área de restauração conflitante em que toda a extensão é coberta por grades em azul, com área contínua, e, logo abaixo, os metadados disponíveis em tabela.



2
cat02
pro02
Projeto de Carbono no Corredor de Biodiversidade EMAS-Taquari
BRCarbon
Não identificado
Conservacao Internacional - CI
mrs07
mot08

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 20 - Segunda área de restauração conflitante em que toda a extensão é coberta por grades em amarelo, apresentando área menor do que a primeira área pelas duas ausências de grade em seu interior, e, logo abaixo, os metadados disponíveis em tabela.



235
cat02
pro02
Projeto de carbono no corredor de biodiversidade EMAS-Taquari
BRCarbon
Não identificado
Conservação Internacional
mrs07
mot08
tip06

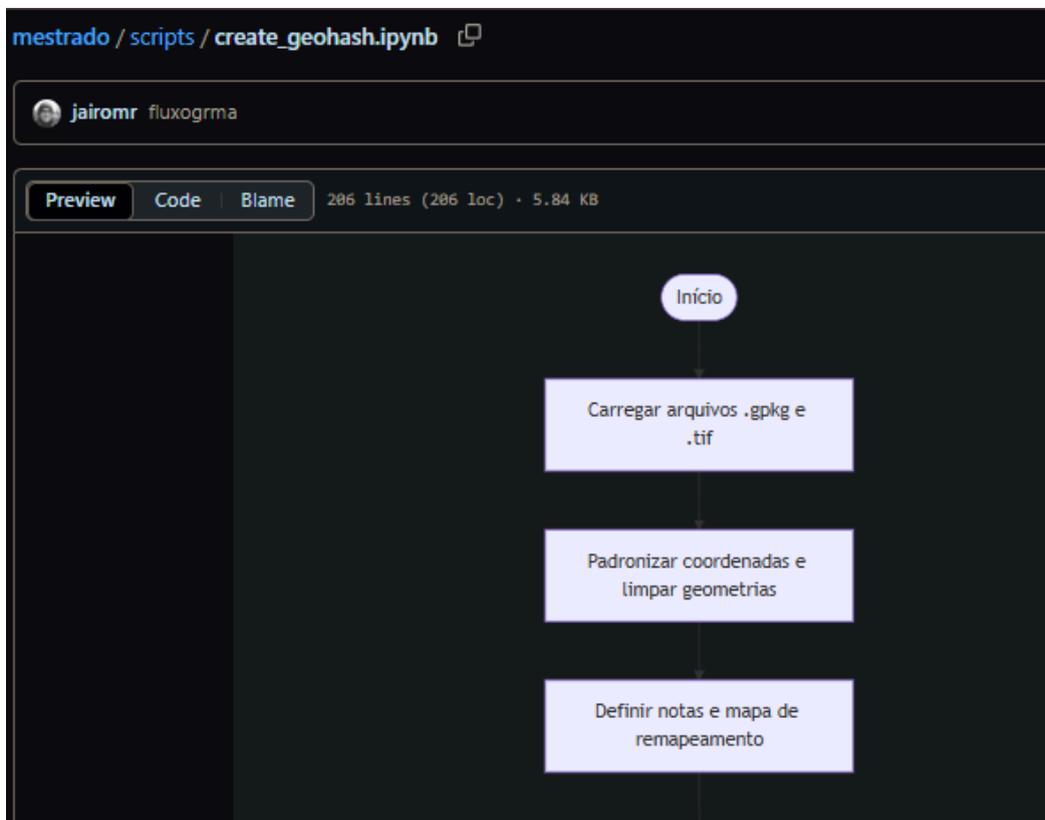
Fonte: Autoria própria (2025).

4.3.2 Discretização dos scripts gerados

A seguir estão listados os links para os scripts gerados nesta pesquisa. Cada script teve o objetivo de automatizar os procedimentos metodológicos delineados e descritos no **Capítulo III (metodologia)**. Estes códigos estão sendo considerados resultados, pois estão disponíveis publicamente no GitHub (<https://github.com/jairomr/mestrado/tree/main>) para que pesquisadores e instituições possam utilizá-los e atualizá-los de acordo com seus projetos.

O primeiro script/*Jupyter Notebook*, disponibilizado nas opções do GitHub, tem como resultado a criação das áreas de interesse desta pesquisa. Os “geohashes” são retângulos agrupando os polígonos de restauração, sendo utilizados como áreas de interesse. O objetivo ao construir este algoritmo foi o de ganhar performance e acelerar o processamento de análises e classificações. Este *Notebook* foi gerado para atender as necessidades metodológicas abordadas no **tópico 3.3 - Amostragem de classes** - e pode ser acessado no link [Create Geohash](#). A Figura 21 demonstra, visualmente, o formato do arquivo.

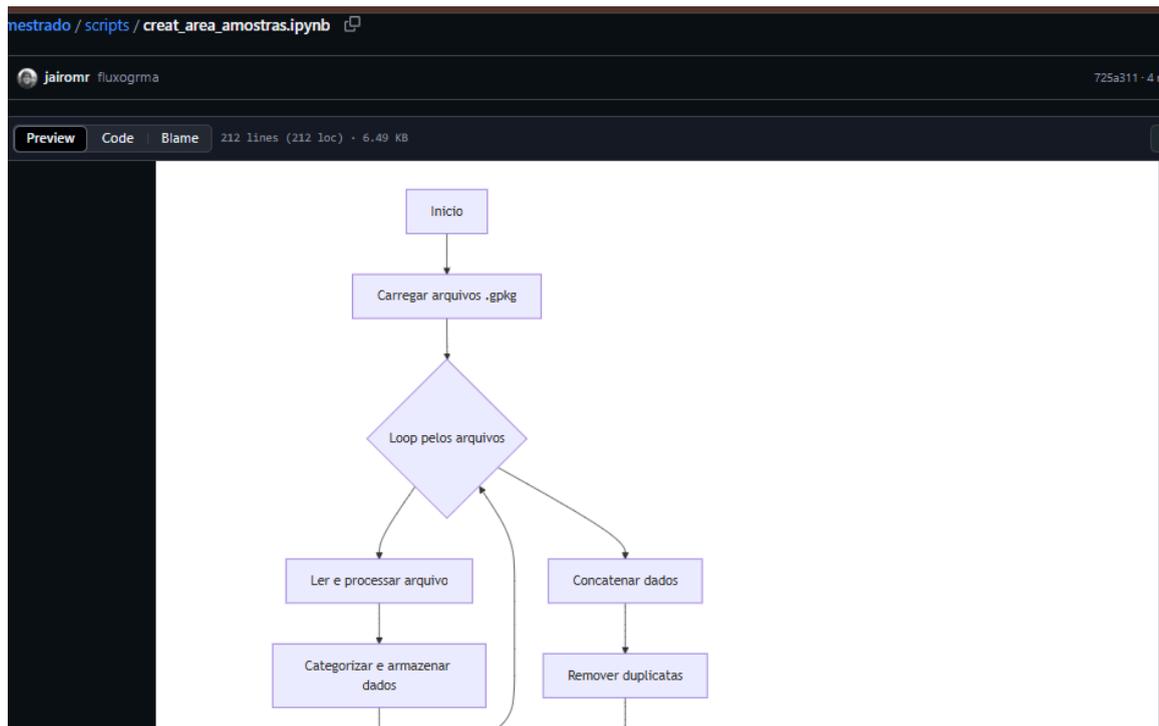
Figura 21 - Demonstração do início do código referente à criação das áreas de interesse (*geohashes*).



Fonte: Autoria própria (2025).

O segundo *Notebook* (Figura 22) teve como objetivo escolher os locais a serem amostrados de forma distribuída dentro de cada *geohash 6* (área de interesse), considerando os polígonos de restauração e as classes de uso disponíveis no raster do MapBiomias. Este script é o resultado gerado para abranger as necessidades metodológicas demonstradas no **tópico 3.3 - Amostragem de classes - e está disponível em [Create amostras](#)**.

Figura 22 - Demonstração do início do código referente à seleção de locais a serem amostrados, visando a facilitação no processo de classificação.



Fonte: Autoria própria (2025).

O terceiro *Notebook*, ainda referente ao **tópico 3.3 - Amostragem de classes -**, organiza os dados obtidos no script anterior (seleção dos locais de amostras). Este código garantiu que o algoritmo de classificação no *Google Earth Engine* (passo seguinte) sempre recebesse uma quantidade distribuída de amostras, garantindo o número mínimo e o máximo de pontos para cada categoria definida nesse estudo, garantindo que não ocorresse *underfitting* ou *overfitting*. Este script (Figura 23) está disponível em **Pós amostragem**.

Figura 23 - Demonstração do início do código referente após o tratamento desenvolvido com as amostragens, visando evitar *underfitting* ou *overfitting* na classificação.

```
mestrado / scripts / pos_amostras.ipynb
jairomr clima 1c67f63 · 4 m
Preview Code Blame 195 lines (195 loc) · 6.58 KB
In [ ]:
import geopandas as gpd
import pandas as pd
from glob import glob
from shapely.geometry import Polygon, MultiPolygon, shape, Point, box
from tqdm import tqdm
import geohash
data = []

from colormap import rgb2hex

_class = [
    {'class': 'PASTURE', 'selected': False, 'rgba': '237, 222, 142, 77'},
    {'class': 'FOREST FORMATION', 'selected': False, 'rgba': '50, 166, 94, 77'},
    {'class': 'AGRICULTURE', 'selected': False, 'rgba': '233, 116, 237, 77'},
    {'class': 'AGROPEC', 'selected': False, 'rgba': '255, 255, 178, 77'},
    {'class': 'FOREST PLANT', 'selected': False, 'rgba': '122, 89, 0, 77'},
    {'class': 'URBAN', 'selected': False, 'rgba': '212, 39, 30, 77'},
    {'class': 'SAVANNA', 'selected': False, 'rgba': '125, 201, 117, 77'},
    {'class': 'WATER', 'selected': False, 'rgba': '0, 0, 255, 77'},
    {'class': 'FLOODED AREA', 'selected': False, 'rgba': '2, 105, 117, 77'},
    {'class': 'WOODED SANDBANK', 'selected': False, 'rgba': '2, 214, 89, 77'},
```

Fonte: Autoria própria (2025).

Com toda a padronização de amostras desenvolvida nos passos anteriores, a classificação utilizando o *Google Earth Engine*, pôde ser executada (Figura 24). Este script teve o objetivo de classificar os diferentes usos do solo nos arredores das áreas de restauração, utilizando os geohashes como áreas de estudo. Cada mosaico Planet para o ano de 2023 teve diversas camadas auxiliares para melhorar sua qualidade, como a utilização de mosaicos entre 2021 e 2023, os índices de vegetação e todas as informações descritas no **tópico 3.4 - Classificação de cobertura do solo** e está disponível em [Classificador](#).

Figura 24 - Demonstração do início do código referente à classificação de uso do solo das áreas de restauração

```
mestrado / scripts / gee / classificador.js
jairomr scripts
Code Blame 413 lines (282 loc) · 14.1 KB
1
2 var clusters = [
3   '7j6122', '6yk7ym', '6znc7w', '6vmm56', '6yk9qc', '7j610p',
4   '6znce8', '6vx5gz', '6zncec', '6yk9x9', '6gvmzx', '6unst4',
5   '6vqt8g', '6gv7r0', '6unshd'
6 ]
7
8
9 var cluster = '6znce8' //'6gur3q'
10 print(cluster)
11
12 var Clima = require("users/jairomr/mestrado:clima")
13
14 var mpb = ee.Image('projects/mapbiomas-public/assets/brazil/lulc/collection9/mapbiomas_collection90_integration_v1')
15
16
17
18
19 var colors = {min: 1, max: 19, palette:
20 [
21   '#F0F0F0', '#F0F0F0', '#F0F0F0',
```

Fonte: Autoria própria (2025).

CAPÍTULO V: CONCLUSÕES GERAIS

A análise dos polígonos de restauração no Cerrado revelou uma concentração significativa de pequenas áreas no estado de São Paulo, possivelmente impulsionada pelas iniciativas locais, como o Sistema de Apoio à Restauração Ecológica (SARE). Essa distribuição indica a necessidade de expandir e otimizar os esforços de restauração para atender plenamente as metas estabelecidas pelo Brasil para conservação e recuperação ambiental no bioma.

A metodologia desenvolvida provou-se eficiente e promissora, com um fluxo de processamento otimizado que permitiu a extração de informações gerais dos polígonos em menos de um dia. A classificação das áreas e a geração de gráficos de análise, incluindo o diagrama de Sankey do capítulo 4.2 - Monitoramento de Restauração no Cerrado Usando Sensoriamento Remoto -, foram realizadas em três dias após testes, demonstrando a praticidade e aplicabilidade dos scripts para análises rápidas e informativas.

A disponibilização dos scripts e da lógica de processamento no GitHub torna essa ferramenta acessível para outros pesquisadores e gestores, incentivando seu uso contínuo e a expansão das aplicações. Um ponto importante para o aprimoramento das classificações é a coleta cuidadosa de amostras, essencial para aumentar a precisão dos resultados.

Os relatórios automatizados se mostraram de aparência simples e bem informativos, especialmente para os coletivos de restauração como a Rede Araticum e o Observatório da Restauração e Reflorestamento do Brasil (ORR), que necessitam destes acompanhamentos para garantir a prosperidade de suas áreas de atuação. Além disso, a disponibilização aberta dos scripts reforça sua capacidade de adaptação a diferentes contextos. A metodologia empregada pode ser replicada para a avaliação de projetos em todo o país, contribuindo para um monitoramento mais eficaz da restauração ecológica.

CAPÍTULO VI: REFERÊNCIAS

ADAMS, C.; ARAUJO, L.; SANCHES, R.; FUTEMMA, C.; BUZATI, J.; SANCHES, V. Governança da restauração florestal da paisagem no brasil: desafios e oportunidades. **Desenvolvimento E Meio Ambiente**, v. 58, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v58i0.78415>.

ALBERTON, B. *et al.* Leafing Patterns and Drivers across Seasonally Dry Tropical Communities. **Remote Sensing 2019**, Vol. 11, Page 2267, [s. l.], v. 11, n. 19, p. 2267, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/19/2267/htm>. Acesso em: 3 ago. 2024.

ALMEIDA, D. S. De. Recuperação ambiental Mata Atlântica. **rev. and enl. Ilhéus**, [s. l.], 2016. Disponível em: <http://books.scielo.org>. Acesso em: 3 ago. 2024.

ALMEIDA, V. T. B. D.; SILVA, K. F. D.; TOKUMOTO, P. M.; TEIXEIRA, L. S.; FERREIRA, P. A.; LOPES, L. E. Identificação de áreas prioritárias para a restauração e conservação em duas áreas de proteção ambiental no estado de são paulo: apa piracicaba e corumbataí. **Research, Society and Development**, v.11 n.14, p. e210111436194, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36194>.

ALVES, S. dos S.; CHEREM, L. F. S. Estrutura espacial e temporal das Unidades de Conservação no Cerrado: heterogeneidade combinada em prol da conservação Spatial and temporal structure of Cerrado Conservation Units: combined heterogeneity for conservation. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 35, 2022. Disponível em: Acesso em: 13 ago. 2024.

ARATICUM. **Araticum - Articulação pela Restauração do Cerrado**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://araticum.lapig.iesa.ufg.br/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

BARBOSA, A. S. O Livro da Terra; Goiânia: Editora América, 2019. p. 69.

BATALHA, M. A. The Brazilian cerrado is not a biome. **Biota Neotropica**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2011. Disponível em: [//www.biotaneotropica.org.br/BN/article/view/794](http://www.biotaneotropica.org.br/BN/article/view/794). Acesso em: 3 ago. 2024.

BINLEY, A. D. *et al.* Minimizing Data Waste: Conservation in the Big Data Era. **The Bulletin of the Ecological Society of America**, [s. l.], v. 104, n. 2, p. e02056, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bes2.2056>. Acesso em: 3 ago. 2024.

BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K.; CAMPOS, S. I. R. E. **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Embrapa:Brasília, 2020.

CAMPBELL, T.; DIXON, K. W.; HANDCOCK, R. N. Restoration and replication: a case study on the value of computational reproducibility assessment. **Restoration Ecology**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. e13968, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/rec.13968>. Acesso em: 10 ago. 2024.

CHAZDON R.; CHAVES R.; CALMON M.; SIQUEIRA L.; JUNQUEIRA R.. Experiências de governança da restauração de ecossistemas e paisagens no brasil. **Estudos Avançados**, [s.

l.,v. 36,n. 106, p. 221-237, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2022.36106.013>.

CHEN, G. *et al.* An Erosion-Based Approach Using Multi-Source Remote Sensing Imagery for Grassland Restoration Patterns in a Plateau Mountainous Region, SW China. **Remote Sensing** 2023, Vol. 15, Page 2047, [*s. l.*], v. 15, n. 8, p. 2047, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/8/2047/htm>. Acesso em: 3 ago. 2024.

CISNEROS-ARAUJO, P. *et al.* Remote sensing of wildlife connectivity networks and priority locations for conservation in the Southern Agricultural Growth Corridor (SAGCOT) in Tanzania. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, [*s. l.*], v. 7, n. 3, p. 430–444, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rse2.199>. Acesso em: 14 ago. 2024.

CLEWELL, A.; ARONSON, J.; WINTERHALDER, K. **Princípios da SER International sobre a restauração ecológica**. Tucson : [*s. n.*], 2004. Disponível em: www.ser.org. Acesso em: 10 ago. 2024.

COELHO, A. J. P. *et al.* Effects of anthropogenic disturbances on biodiversity and biomass stock of Cerrado, the Brazilian savanna. **Biodiversity and Conservation**, [*s. l.*], v. 29, n. 11–12, p. 3151–3168, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-020-02013-6>. Acesso em: 3 ago. 2024.

CUNNINGHAM, P.; DELANY, S. J. Underestimation bias and underfitting in machine learning. In: Trustworthy AI-Integrating Learning, Optimization and Reasoning: First International Workshop, TAILOR 2020, Virtual Event, September 4–5, 2020, Revised Selected Papers 1. Springer International Publishing, 2021. p. 20-31.

DALLE LASTE, K. C.; DURIGAN, G.; ANDERSEN, A. N. Biodiversity responses to land-use and restoration in a global biodiversity hotspot: Ant communities in Brazilian Cerrado. **Austral Ecology**, [*s. l.*], v. 44, n. 2, p. 313–326, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/aec.12676>. Acesso em: 14 ago. 2024.

DARONCO, C. ;MELO, A.; DURIGAN, G.. Ecosistema em restauração versus ecossistema de referência: estudo de caso da comunidade vegetal de mata ciliar em região de cerrado, assis, sp, brasil. **Hoehnea**, v. 40, n. 3, p. 485-498, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s2236-89062013000300008>.

DEL RÍO-MENA, T. *et al.* Remote sensing for mapping ecosystem services to support evaluation of ecological restoration interventions in an arid landscape. **Ecological Indicators**, [*s. l.*], v. 113, p. 106182, 2020. Disponível em: Acesso em: 10 ago. 2024.

DONG, R. *et al.* Optimization of post-classification processing of high-resolution satellite image: A case study. **Science in China, Series E: Technological Sciences**, [*s. l.*], v. 49, n. SUPPL. 1, p. 98–107, 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11431-006-8111-3>. Acesso em: 3 ago. 2024.

FONSECA, F. N. de A.; BUSTAMANTE, M. M. da C. The Importance of Indigenous Territories for the Provision of Ecosystem Services in the Brazilian Cerrado and the

Cerrado-Amazon Transition. [s. l.], Disponível em: <https://papers.ssrn.com/abstract=4855858>. Acesso em: 9 ago. 2024.

HOFMANN, G. S. *et al.* The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 27, n. 17, p. 4060–4073, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.15712>. Acesso em: 3 ago. 2024.

HONDA, E. A.; DURIGAN, G. A restauração de ecossistemas e a produção de água. **Hoehnea**, [s. l.], v. 44, n. 3, p. 315–327, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hoehnea/a/94FLKd8kSgdzCHNpVsjfMJQ/?lang=pt>. Acesso em: 3 ago. 2024.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 295–309, 1988. Disponível em: Acesso em: 3 ago. 2024.

JIA, X. *et al.* Monitoring and Effect Evaluation of an Ecological Restoration Project Using Multi-Source Remote Sensing: A Case Study of Wuliangshuai Watershed in China. **Land** **2023**, Vol. 12, Page 349, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 349, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/12/2/349/htm>. Acesso em: 3 ago. 2024.

JOSÉ, J. V. *et al.* Spatial-temporal dynamics of biome Cerrado using different vegetation indexes. **Australian Journal of Crop Science**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 1438–1446, 2019.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **MEGADIVERSIDADE**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2005. Disponível em: Acesso em: 9 ago. 2024.

KOWE, P.; MUTANGA, O.; DUBE, T. Advancements in the remote sensing of landscape pattern of urban green spaces and vegetation fragmentation. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 42, n. 10, p. 3797–3832, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2021.1881185>. Acesso em: 3 ago. 2024.

LIU, J. *et al.* A geohash-based index for spatial data management in distributed memory. **Proceedings - 2014 22nd International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2014**, [s. l.], 2014. Disponível em: Acesso em: 4 ago. 2024.

LIU, Q. *et al.* Ecological restoration is the dominant driver of the recent reversal of desertification in the Mu Us Desert (China). **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 268, p. 122241, 2020. Disponível em: <https://pure.au.dk/portal/en/publications/ecological-restoration-is-the-dominant-driver-of-the-recent-rever>. Acesso em: 4 ago. 2024.

LIU, H. Q.; HUETE, A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 457–465, 2019. Disponível em: Acesso em: 3 ago. 2024.

LORTIE, C. J. *et al.* The importance of open data describing prey item species lists for endangered species. **Ecological Solutions and Evidence**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. e12251, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2688-8319.12251>. Acesso em: 3 ago. 2024.

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M. M.; JOHNSON, D. E. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. **Geocarto International**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 65–70, 2001. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106040108542184>. Acesso em: 3 ago. 2024.

MAPBIOMAS BRASIL. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/ferramentas#>. Acesso em: 4 ago. 2024.

MIRZABAEV, A.; WUEPPER, D. Economics of Ecosystem Restoration. **Annual Review of Resource Economics**, [s. l.], v. 15, n. Volume 15, 2023, p. 329–350, 2023. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-resource-101422-085414>. Acesso em: 3 ago. 2024.

NICFI. Norway's International Climate and Forest Initiative (NICFI). Disponível em: <https://www.nicfi.no/>.

ORR. OBSERVATÓRIO DA RESTAURAÇÃO E REFLORESTAMENTO. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://observatoriodarestauracao.org.br/home>. Acesso em: 3 ago. 2024.

OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. S. The Cerrados of Brazil. [s. l.], 2002. Disponível em: Acesso em: 3 ago. 2024.

PETTORELLI, N.; SCHULTE TO BÜHNE, H. Current and future opportunities for satellite remote sensing to inform rewilding. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 301–310, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rse2.321>. Acesso em: 3 ago. 2024.

QGIS Development Team, 2024. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

RODRIGUES, A. A. *et al.* Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 28, n. 22, p. 6807–6822, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.16386>. Acesso em: 3 ago. 2024.

ROUSE, J. W. , Jr. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A**, [s. l.], 1974. Disponível em: Acesso em: 3 ago. 2024.

SAMBUICHI, R. H. R. *et al.* A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios. **Repositório do Conhecimento do IPEA**, [s. l.], 2012. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/1050>. Acesso em: 3 ago. 2024.

SCHMIDT, H. E. *et al.* Connecting the Dots: How Ecohydrological Connectivity Can Support Remote Sensing and Modeling to Inform Management of Woody Plant Encroachment. **Rangeland Ecology & Management**, [s. l.], v. 95, p. 84–99, 2024. Disponível em: Acesso em: 9 ago. 2024.

SOBRE. **Vitrine da Restauração**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://sobrestauracao.org/mapa.html>. Acesso em: 10 ago. 2024.

STRASSBURG, B. B. N. *et al.* Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution** 2017 1:4, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 1–3, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41559-017-0099>. Acesso em: 9 ago. 2024.

VAN OOSTEN, C. Restoring Landscapes—Governing, Place: A Learning Approach to Forest Landscape Restoration. **Journal of Sustainable Forestry**, [s. l.], v. 32, n. 7, p. 659–676, 2013. Disponível em: <https://research.wur.nl/en/publications/restoring-landscapesgoverning-place-a-learning-approach-to-forest>. Acesso em: 10 ago. 2024.

WANG, R. *et al.* Remote Sensing Application in Ecological Restoration Monitoring: A Systematic Review. **Remote Sensing** 2024, Vol. 16, Page 2204, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 2204, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/12/2204/htm>. Acesso em: 10 ago. 2024.

WEIGONG, C. Research on control of the data quality in digital land spatial database based on GIS. **Proceedings - 2009 1st International Workshop on Database Technology and Applications, DBTA 2009**, [s. l.], p. 373–376, 2009. Disponível em: Acesso em: 3 ago. 2024.

WOEBBECKE, D. M. *et al.* Color Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions. **Transactions of the ASAE**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 259–269, 1995. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=3&AID=27838&CID=t1995&v=38&i=1&T=1>. Acesso em: 3 ago. 2024.