

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO PARÁ - CESUPA
ESCOLA DE NEGÓCIOS, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO - ARGO
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

CARLOS EDUARDO NYLANDER BITENCOURT DIAS
RAFAEL LUÍS CARVALHO BARROS

**MACHINE LEARNING E CONSERVAÇÃO DA AMAZÔNIA: UMA REVISÃO
SOBRE O USO DE MACHINE LEARNING NA CONSERVAÇÃO DA REGIÃO DA
AMAZÔNIA**

BELÉM
2023

CARLOS EDUARDO NYLANDER BITENCOURT DIAS

RAFAEL LUÍS CARVALHO BARROS

**MACHINE LEARNING E CONSERVAÇÃO DA AMAZÔNIA: UMA REVISÃO
SOBRE O USO DE MACHINE LEARNING NA CONSERVAÇÃO DA REGIÃO DA
AMAZÔNIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Negócios, Tecnologia e Inovação do Centro Universitário do Estado do Pará como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação na modalidade ARTIGO.

Orientador: Dr. Vitor Hugo Freitas Gomes

Coorientador: Dr. Isaac Souza Elgrably

BELÉM

2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
Biblioteca do CESUPA, Belém – PA

Dias, Carlos Eduardo Nylander Bittencourt.

Machine learning e conservação da Amazônia: uma revisão sobre o uso de machine learning na conservação da região da Amazônia / Carlos Eduardo Nylander Bittencourt Dias, Rafael Luís Carvalho Barros; orientador Vitor Hugo Freitas Gomes, coorientador Isaac Souza Elgrably. — 2023.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Centro Universitário do Estado do Pará, Belém, 2023.

1. Inteligência artificial. 2. Learning, Machine. 3. Biodiversidade – Conservação. I. Barros, Rafael Luís Carvalho. II. Gomes, Vitor Hugo Freitas, orient. III. Elgrably, Isaac Souza. IV. Título.

CDD 23^a ed. 006.3

CARLOS EDUARDO NYLANDER BITENCOURT DIAS

RAFAEL LUÍS CARVALHO BARROS

**MACHINE LEARNING E CONSERVAÇÃO DA AMAZÔNIA: UMA REVISÃO
SOBRE O USO DE MACHINE LEARNING NA CONSERVAÇÃO DA REGIÃO DA
AMAZÔNIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Negócios, Tecnologia e Inovação do Centro Universitário do Estado do Pará como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação na modalidade ARTIGO.

Data da aprovação: 07 / 12 / 2023

Nota final aluno(a) I: 9,5

Nota final aluno(a) II: 9,5

Banca examinadora

Prof. Dr. Vitor Hugo Freitas Gomes

Orientador e Presidente da banca

Profª. Ma. Polyana Santos Fonseca Nascimento

Examinadora interna

Prof. Dr. Fábio Rocha De Araújo

Examinador interno

AGRADECIMENTOS

CARLOS EDUARDO NYLANDER BITENCOURT DIAS

Agradeço aos meus pais, Irian e Eduardo Bitencourt, pelo incentivo, dedicação e paciência, além do amor incondicional que me carregam todos os dias. Além disso agradeço por terem me guiado, cobrado e ensinado sempre da melhor maneira possível, não me deixando desistir, e me incentivando a seguir meu próprio caminho e sendo minhas inspirações como pessoas e como profissionais.

Agradeço as minhas tias Cristiane Bitencourt, Cilene Pinheiro e ao meu irmão Thiago Nylander por sempre estarem comigo, por cuidarem de mim, e por serem um exemplo acadêmico e profissional a ser seguido.

Agradeço aos meus amigos da faculdade, ensino médio, academia e RPG, pelos momentos de companheirismo, compreensão e força em todos os momentos, tenho orgulho de todos e espero que nossa amizade seja eterna.

Agradeço ao meu companheiro de TCC Rafael Barros, por ser o cientista que faltava para esse trabalho ser feito como deveria, e por ser um bom amigo. Ao nosso orientador Vitor Hugo Freitas Gomes e ao coorientador Isaac Sousa Elgrably, pela orientação, correções, camaradagem e ensinamentos que foram fundamentais neste processo.

Por fim, agradeço a academia Powerzone e a equipe de Powerlifting por serem minha segunda casa e refúgio em tempos turbulentos e por me ensinarem a ser mais forte do que eu sonhava ser capaz.

RAFAEL LUÍS CARVALHO BARROS

Agradeço primeiramente ao apoio da minha mãe, Darlane Carvalho dos Reis; por me levantar nos momentos difíceis e estar presente mesmo à distância. Seu amor e carinho, além da confiança em mim quando minha autoestima falhou, foram de extrema importância por toda a trajetória deste trabalho e além.

Agradeço ao magnífico Doutor Evonnildo Gonçalves, pelo apoio como uma segunda família aqui em Belém, por ter me garantido ambiente seguro durante esses anos e me ajudar a enfrentar todos os desafios e obstáculos da forma que lhe era apta.

Ao corpo docente do Bacharelado em Ciência da Computação, em especial à Professora Mestre Alessandra Natasha, pelo conforto e desafios postos para meu crescimento e avanço acadêmico e como cientista.

Aos meus muitos amigos, que se propriamente nominados produziram uma lista que excede as boas práticas e cansariam os futuros leitores deste trabalho, que em cada qual foram vitais para que eu obtivesse sucesso enfrentando os desafios acadêmicos, emocionais e pessoais durante esses anos.

Aos profissionais da saúde, do Cesupa e pessoais, que foram minha rede apoio e responsáveis por manter minha sanidade nos momentos desafiadores em que foram necessitados.

Agradeço ao orientador Professor Doutor Vitor Hugo Freitas Gomes e ao coorientador Professor Doutor Isaac Sousa Elgrably, pela orientação, paciência, ensinamentos e incentivo fundamentais para a conclusão desta pesquisa.

E por fim, e não menos importante, estendo meus agradecimentos ao meu colega de pesquisa, Carlos Eduardo Nylander Bitencourt Dias, pelo convite de integrar esta pesquisa e a oportunidade de avançar com os estudos científicos da academia brasileira.

RESUMO

Com extensão aproximada de 6 milhões km², a Floresta Amazônica é uma região de interesse global, sobretudo por sua grande biodiversidade ainda não ter sido mensurada. A floresta exerce parte importante do controle climático regional e global, sequestrando CO₂, contribuindo para formação de chuvas e diversos ciclos biogeoquímico. Sua contribuição para a subsistência de comunidades de povos originários e tradicionais, tão pouco deve ser negligenciado. Apesar disso, o território enfrenta grandes desafios, sofrendo com os impactos do desmatamento, queimadas, mudanças climáticas globais, poluição e mais. Nos esforços de conservação da região, a utilização de ferramentas e tecnologias cada vez mais sofisticadas, tem levado à implementação da Inteligência Artificial e suas subáreas, como o caso do *machine learning*, que tem contribuído para o desenvolvimento de estudos preditivos na Amazônia. Aqui, foram revisados estudos realizados onde foi implementado o *machine learning* na conservação do território da Amazônia, buscamos aprofundar sobre suas limitações e o futuro do uso dessa tecnologia. Concluiu-se que, enquanto tecnologia, o *machine learning* tem ajudado os esforços de preservação, mas há ainda muito que pode ser feito para melhorar o seu uso, como a utilização de dados mais abrangentes, o treinamento de profissionais para implementação adequada da tecnologia e análise dos resultados, sendo estas melhorias cruciais para o futuro dos esforços de conservação na Amazônia.

Palavras-chave: Amazônia; Conservação; Impactos Ambientais; *Machine Learning*.

ABSTRACT

With an approximated expanse of 6 million km², the Amazon Rainforest is a region of global interest, particularly for its great biodiversity some of which still unmeasured. The forest exercises an important part in regional and global climate control, capturing and storing CO₂, contributing with rain formation and varied biogeochemical cycles. Its large contribution to the livelihood of native and traditional communities is not to be neglected. Despite it all, the territory faces great challenges, suffering with the impacts of deforestation, fires, global climate change, pollution, and more. In its conservation efforts, the usage of advancing tools and technology has resulted in the implementation of Artificial Intelligence and its sub-areas, such as Machine Learning, which has contributed to the development of predictive studies in the Amazon. Here, we revised studies that implemented Machine Learning in the conservation of Amazon's territory, seeking a deeper understanding of its limitations and future usage of this technology. We concluded that, as a technology Machine Learning has helped in preservation efforts, but there still is much that can be done to improve its usage, such as the utilization of comprehensive data, training of professionals and experts to adequately implement the technology and to analyze the results, being these improvements crucial to the future conservation efforts in the Amazon Region.

Keywords: Amazon; Conservation; Environmental Impacts; Machine Learning.

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO	9
1.1. Revisão bibliográfica	9
1.1.1. Amazônia	9
1.1.2. Impactos Ambientais.....	10
1.1.3. Tecnologias na análise de impactos ambientais.....	10
1.1.4. Machine learning.....	12
1.2. Problema da pesquisa	13
1.3. Justificativa	13
1.4. Objetivos.....	14
1.4.1. Objetivo geral.....	14
1.4.2. Objetivos específico:.....	14
1.5. Estrutura do Trabalho	14
2. MACHINE LEARNING E CONSERVAÇÃO DA AMAZÔNIA.....	15
2.1. Introdução	15
2.2. Metodologia da pesquisa.....	16
2.3. Resultados	17
2.4. Discussão	19
2.4.1. Tendências no uso do <i>machine learning</i>	20
2.4.2. Potencialidades e contribuições para a conservação	20
2.4.3. Limitações na conservação e desafios futuros	21
2.4.4. Contribuições para a ciência	22
2.5. Conclusão	23
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

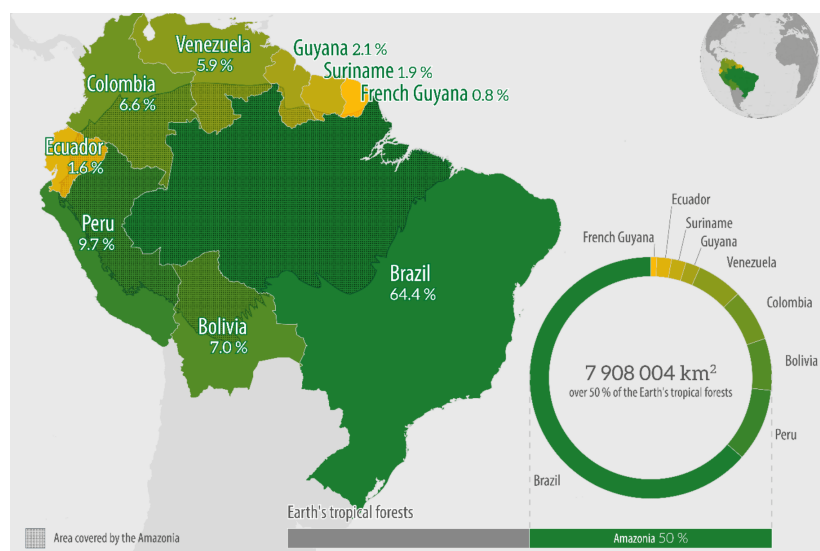
1.1. Revisão bibliográfica

1.1.1. Amazônia

A Amazônia é uma das regiões mais significativas e diversificadas do planeta, compreendendo a vasta porção de floresta tropical localizada na Região Neotropical. Ela abriga uma rica biodiversidade, desempenhando um papel fundamental no equilíbrio climático global contribuindo para a manutenção de comunidades e populações locais (Do Vale Júnior *et al.*, 2011). O território amazônico é caracterizado por sua extensa cobertura florestal, que se estende por aproximadamente 6 milhões de quilômetros quadrados (Britannica *et al.*, 2023). A Amazônia desempenha um papel fundamental na manutenção do equilíbrio climático global, atuando como grande sumidouro de carbono, captando e armazenando o CO₂ da atmosfera, contribuindo significativamente para a regulação do clima regional e global. Além disso, a região é vital para o ciclo da água, com a evaporação da floresta contribuindo para a formação de chuvas, sobretudo na América do Sul e além (Nobre *et al.*, 2016). Portanto, as mudanças na Amazônia têm implicações não apenas locais, mas também globais.

É possível observar a área estimada da Floresta Amazônica na figura 1, assim como o percentual da região que se encontra em cada um dos oito países da América Latina, como também da Guiana Francesa.

Figura 1 – Área da Amazônia e sua divisão em territórios soberanos



Fonte: European Parliament Research Service. Disponível em: <https://epthinktank.eu/2019/12/16/amazon-wildfire-crisis-need-for-an-international-response-policy-podcast/amazonian-region/>. Acesso em: 14, dezembro, 2023

1.1.2. Impactos Ambientais

A Amazônia brasileira é uma região que tem enfrentado diversos tipos impactos ambientais, alguns dos quais têm consequências globais significativas, dentre eles, o desmatamento, um dos principais desafios enfrentados pela Amazônia na atualidade. O desmatamento tem sido objeto de crescente preocupação, devido à perda irreparável de ecossistemas e à liberação de grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, onde medidas de conservação e fiscalização são cruciais para combater este tipo de impacto (Nepstad *et al.*, 2014). A expansão da fronteira agropecuária, frequentemente, está associada ao desmatamento, à medida em que áreas florestais são convertidas em pastagens e plantações (Alencar *et al.*, 2018). Outro impacto crítico está relacionado à exploração de recursos naturais, como a mineração. A extração de minérios, apesar de representar esforços de transformação em escala local, tem implicações ambientais significativas, incluindo a degradação do solo e da água (Rudke *et al.*, 2020). Além disso, as mudanças climáticas globais, têm impactado a Amazônia, contribuindo para o aumento da temperatura e as mudanças nos padrões de chuva que afetam diretamente a biodiversidade da floresta tropical, com implicações para a biodiversidade e a saúde dos ecossistemas (Nobre *et al.*, 2016; Gomes *et al.*, 2019). A compreensão desses impactos complexos e interligados é fundamental para a conservação da Amazônia.

A conscientização sobre os desafios enfrentados pela Amazônia também tem levado a iniciativas de pesquisa e políticas públicas para a conservação da biodiversidade e o reconhecimento dos direitos das comunidades tradicionais. A pesquisa de (Nobre *et al.*, 2016) destaca a necessidade de novas formas de uso da terra entre os agricultores na região, indicando a importância de abordagens integradas e respeitadas para a preservação da cultura e dos ecossistemas amazônicos. A Amazônia permanece como um centro crítico de pesquisa e ação global, onde a conservação ambiental, a mitigação das mudanças climáticas e o respeito aos direitos humanos continuam a ser tópicos de relevância incontestável.

1.1.3. Tecnologias na análise de impactos ambientais

O registro e mapeamento dos impactos ambientais na Amazônia têm se beneficiado significativamente do avanço tecnológico, onde sensoriamento remoto por meio de satélites tem sido uma ferramenta crucial para monitorar o desmatamento. Estudos como o De Souza Jr *et al.* (2013) demonstram a eficácia do uso de imagens de satélite para identificar áreas desmatadas e acompanhar as mudanças na cobertura florestal. Essa tecnologia permite análises de longo prazo e em grande escala, proporcionando uma visão abrangente dos impactos, outra tecnologia emergente é o uso de drones para a coleta de dados em áreas de difícil acesso, onde

pesquisas como a de Shimabukuro *et al.* (2020), destacam a utilidade dos drones na obtenção de informações detalhadas sobre o desmatamento e a topografia da Amazônia. Essas informações são cruciais para avaliar impactos e planejar medidas de conservação.

Além do sensoriamento remoto por satélites e do uso de drones, sistemas de informações geográficas (SIG) desempenham um papel fundamental na análise espacial dos impactos ambientais na Amazônia, essas ferramentas permitem a integração de dados de várias fontes, incluindo imagens de satélite, informações topográficas e registros de campo. A pesquisa de Grecchi *et al.* (2021) exemplifica como SIGs podem ser empregados para criar mapas detalhados de cobertura terrestre e auxiliar na gestão de recursos naturais.

A tecnologia de Teledetecção a Laser (LiDAR) também tem sido usada para coletar dados altamente precisos sobre a topografia e a estrutura da vegetação na Amazônia. Esses dados tridimensionais são essenciais para compreender a complexidade dos ecossistemas amazônicos e podem ser combinados com imagens de satélite para análises mais abrangentes e multitemporais (Moura *et al.*, 2020).

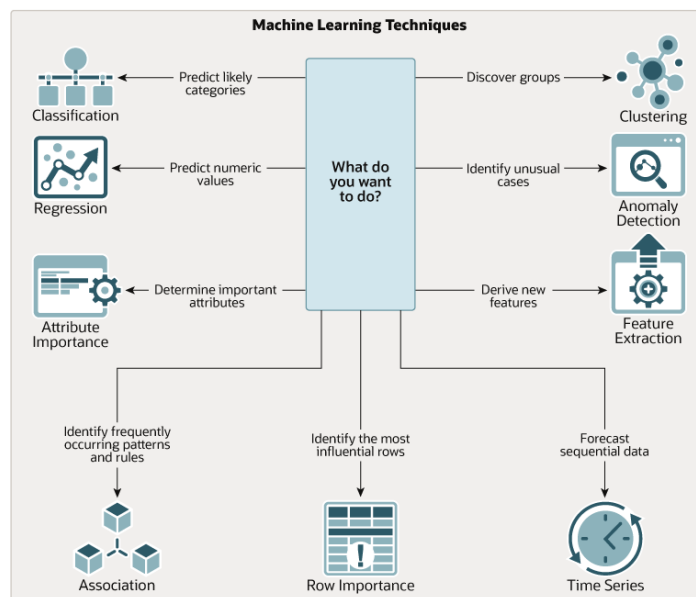
O emprego de técnicas de *machine learning* também tem se destacado no processamento e análise de dados obtidos por meio das tecnologias de mapeamento como sensoriamento remoto e drones. Estudos como os de Grecchi *et al.* (2021), Gomes *et al.* (2018, 2019) e Ter Steege *et al.* (2020) demonstram o uso de algoritmos de *machine learning* para modelar a distribuição de espécies para a avaliação da conservação da biodiversidade e impactos da Amazônia. A inteligência artificial, além do *machine learning*, desempenha um papel crescente na análise de dados complexos da Amazônia. Algoritmos de aprendizado profundo (do inglês *deep learning*), por exemplo, são usados para identificar automaticamente padrões em imagens de satélite, permitindo a detecção rápida de mudanças na cobertura florestal (Dominguez *et al.*, 2022). Essas tecnologias aceleram a análise de grandes conjuntos de dados e podem contribuir para uma resposta mais ágil a eventos de desmatamento ilegal.

Em síntese, a combinação de sensoriamento remoto, drones, SIGs, LiDAR e inteligência artificial tem revolucionado a forma como registramos e mapeamos os impactos ambientais na Amazônia. Essas tecnologias proporcionam uma compreensão cada vez mais profunda dos desafios enfrentados pela região e desempenham um papel crucial na preservação desse ecossistema único.

1.1.4. Machine learning

O *machine learning* (do inglês, aprendizado de máquina) é uma subárea da inteligência artificial que se baseia em um conjunto diversificado de algoritmos e técnicas que permitem que sistemas computacionais aprendam e melhorem seus processos a partir dos dados que manipulam (Theobald, 2017). Essa capacidade de aprender por meio dos dados manipulados é fundamental para a tomada de decisões e para a automatização de tarefas complexas. Os algoritmos de *machine learning* podem ser supervisionados, não supervisionados ou por reforço, dependendo do tipo de tarefa que desejam realizar (Mahesh, 2020). Supervisionados são comuns em tarefas de classificação, como identificar spam em e-mails, enquanto não supervisionados são frequentemente usados para agrupamento de dados, como a segmentação de clientes em grupos com base em seus padrões de compra. (Russell, 2010). As técnicas de *machine learning* são variadas e podem ser utilizadas para diversos propósitos, como demonstrado na figura 2.

Figura 2. Possíveis usos de *machine learning*



Fonte: Oracle Help Center. Disponível em: <https://docs.oracle.com/en/database/oracle/machine-learning/oml4sql/21/dmcon/machine-learning-basics.html#GUID-99532F63-0417-45DC-908D-C5D7FCD083D9>. Acesso em: 14, Dezembro de 2023.

Uma característica distintiva do *machine learning* é a sua capacidade de lidar com dados complexos e não-lineares, muitas vezes em altas dimensões (Kelleher, 2020). Essa abordagem é particularmente valiosa para analisar conjuntos de dados ambientais ricos e variados, como os obtidos por sensoriamento remoto e monitoramento da biodiversidade na Amazônia. A pesquisa de Razafindrakoto *et al.* (2020) destaca o potencial do *machine learning* na

conservação da biodiversidade, fornecendo percepções valiosas para a gestão de áreas protegidas e a prevenção da perda de espécies. Além disso, o *machine learning* também é crucial na análise de séries temporais, como dados climáticos e de desmatamento. Essas técnicas permitem identificar tendências e padrões em dados ao longo do tempo, auxiliando na previsão de eventos futuros, como a expansão do desmatamento na Amazônia, conforme demonstrado por Bellard *et al.* (2012) em relação às mudanças climáticas e invasões biogeográficas.

Em resumo, o *machine learning* contribui para que sistemas computacionais possam aprender e tomar decisões com base em dados, desempenhando um papel fundamental em diversos campos da ciência. Recentemente, o *machine learning* tem desempenhado um papel crescente na análise de impactos ambientais, como na Amazônia. Pesquisadores têm utilizado algoritmos de *machine learning* para classificar cobertura terrestre, prever desmatamento e monitorar mudanças na biodiversidade, como demonstrado por Maia *et al.* (2020) Grechi *et al.* (2021). Essas aplicações exemplificam a versatilidade e o potencial dessa tecnologia em diversas áreas.

1.2. Problema da pesquisa

O *machine learning* tem se mostrado uma ferramenta promissora no aprofundamento dos conhecimentos sobre complexidade dos ecossistemas amazônicos e na identificação dos impactos ambientais causados na região. Todavia, a Amazônia é uma região vasta que vem sofrendo com a ação humana por décadas, uma revisão do uso de *machine learning* na análise de impactos ambientais na Amazônia pode, portanto, contribuir para o entendimento sobre as diferentes formas de implementação dessa tecnologia e suas limitações, a fim de subsidiar novos avanços na utilização desta tecnologia.

1.3. Justificativa

A Amazônia é a região mais importante do planeta em termos de biodiversidade e serviços ecossistêmicos, desempenhando um papel fundamental na regulação do clima global e na manutenção da estabilidade ambiental do planeta. No entanto, a região está sob crescente desmatamento, queimadas, mineração e outras atividades econômicas ameaçando sua integridade ecológica e social. Com isso, é essencial que sejam encontradas soluções para minimizar os impactos das atividades humanas, e promover a conservação da região. O uso de tecnologias avançadas, como o *machine learning*, tem se mostrado promissor na construção do entendimento da complexidade dos ecossistemas amazônicos e na identificação de caminhos

para minimizar seus impactos negativos. Com base nessa revisão, seria possível gerar conhecimentos relevantes para o avanço da ciência ambiental na região amazônica, bem como para orientar tomadas de decisão em políticas públicas e estratégias de conservação. Além disso, a revisão poderia contribuir para o desenvolvimento de novas aplicações e metodologias envolvendo *machine learning*, com potencial para impactar positivamente a gestão e a conservação de outros ecossistemas do planeta.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo geral

Desenvolver uma revisão sistemática sobre o uso de *machine learning* na análise de impactos ambientais na Amazônia e avaliar o estado atual da implementação desta tecnologia.

1.4.2. Objetivos específicos:

- Levantar materiais bibliográficos sobre o uso de *machine learning* em análises de impactos ambientais na Amazônia;
- Avaliar os usos de *machine learning* encontradas durante o levantamento bibliográfico;
- Discutir as aplicações de *machine learning* e identificar limitações no uso da tecnologia.

1.5. Estrutura do Trabalho

O trabalho possui uma estrutura, composta por duas seções principais. A primeira seção é dedicada à contextualização, abrangendo uma revisão bibliográfica sobre a Amazônia, impactos ambientais na região e o uso do *machine learning* na análise desses impactos. Nesta seção, também são apresentados os objetivos e a justificativa da pesquisa. A segunda seção foca na elaboração de um artigo sobre o uso de *machine learning* na avaliação de impactos ambientais na Amazônia, apresentando uma introdução sobre a temática, a metodologia, incluindo detalhes sobre a busca e seleção de materiais bibliográficos, bem como a análise dos resultados e discussões destes resultados.

2. MACHINE LEARNING E CONSERVAÇÃO DA AMAZÔNIA

2.1. Introdução

A Amazônia abriga mais de 30% das espécies de plantas do planeta e uma grande diversidade de animais, incluindo espécies ameaçadas de extinção, (Marengo; Souza Júnior, 2018), sendo reconhecida internacionalmente por sua importância ambiental como uma das maiores florestas tropicais do mundo (Perez *et al.*, 2020). Entretanto, a crescente exploração humana na região tem levado a uma perda significativa de sua biodiversidade. Isto tem contribuído de forma negativa para o clima global (Bellard *et al.*, 2012). O desmatamento na região também tem aumentado a cada ano, representando uma perda total de 7.900 km² de floresta entre agosto de 2017 e julho de 2018 (Alencar *et al.*, 2018). Diante dessa problemática, estudos recentes têm explorado potenciais tecnologias para analisar e monitorar a biodiversidade da Amazônia, em busca de percepções valiosas sobre as interações entre espécies, padrões de distribuição e ecologia dos ecossistemas amazônicos considerando a crescente alteração ecológica causada a esses sistemas (Nascimento *et al.*, 2019.), com isso, o uso de tecnologias como o *machine learning*, tem sido uma ferramenta promissora para entender melhor a complexidade dos ecossistemas amazônicos (Maia *et al.*, 2020; Guimarães *et al.*, 2021).

O *machine learning* é um subcampo da inteligência artificial que se preocupa com o desenvolvimento de algoritmos capazes de aprender a partir de um conjunto de dados. Através do uso de técnicas estatísticas e de aprendizado estatístico, os algoritmos de *machine learning* são capazes de identificar padrões e estruturas nos dados, e utilizá-los para realizar previsões e tomar decisões (Russell, 2010). O conceito de *machine learning* é amplamente utilizado em diversas áreas, como reconhecimento de fala, visão computacional, diagnóstico médico, análise de sentimentos e recomendação de produtos em e-commerce (Mahesh, 2020). Em resumo, o *machine learning* é uma abordagem computacional que permite que os sistemas aprendam e melhorem a partir da experiência, extrapolando-se dos dados informados, e é uma área em constante evolução com um grande potencial para transformar diversos setores da sociedade (Goodfellow; Bengio; Courville, 2016). Sua capacidade de funcionar com uma quantidade reduzida de dados, aprendendo com a extrapolação dos mesmos, faz desta técnica uma ferramenta apropriada para situações em que há carência de dados, como é o caso da Amazônia.

A aplicação do *machine learning* na análise de impactos ambientais na Amazônia pode contribuir significativamente para a identificação de soluções e orientar políticas voltadas à conservação de sua biodiversidade (Razafindrakoto *et al.*, 2020; Rosan *et al.*, 2021). Apesar de

existirem pesquisas recentes sobre o uso do Machine Learning em estudos de impactos ambientais na Amazônia, é importante avaliar suas limitações e potencialidades para orientar futuros estudos (Grecchi *et al.*, 2021). Isso é fundamental para avançar a ciência ambiental na região e aplicar o *machine learning* de maneira mais eficiente. Embora seja uma tecnologia promissora para estudos sobre monitoramento de espécies, detecção de mudanças de uso da terra, análise de padrões climáticos e outras aplicações, existem limitações que precisam ser consideradas, como a dependência de dados de qualidade e a necessidade de um conhecimento prévio sobre a área de estudo (Vasconcelos *et al.*, 2020).

Neste estudo, será explorada a aplicação do *machine learning* como uma ferramenta inovadora para a análise e monitoramento dos impactos ambientais na região da Amazônia. Diante da complexidade dos ecossistemas amazônicos e dos desafios impostos pela crescente exploração humana, o uso dessa tecnologia surge como uma abordagem promissora para compreender os padrões de distribuição das espécies, as interações ecológicas e os efeitos das alterações ambientais. Com base em uma revisão sistemática de literatura, pretendemos identificar suas potencialidades e limitações, auxiliando assim no desenvolvimento de estratégias eficazes de conservação e na formulação de políticas voltadas para a preservação desse ecossistema vital. A evolução contínua nesse campo promete contribuir significativamente para a compreensão e preservação do ecossistema amazônico.

2.2. Metodologia da pesquisa

Nesse estudo, foi abordada a evolução do uso de *machine learning* na análise de impactos ambientais na região da Amazônia, com o objetivo de compreender como essa tecnologia tem sido aplicada para elucidar as complexas interações entre ecossistemas e as alterações ambientais decorrentes da exploração humana. Para conduzir essa análise de maneira sistemática, adotamos uma abordagem detalhada de busca e seleção de artigos científicos, onde, inicialmente, foram realizadas buscas na base de dados Google Scholar, utilizando uma combinação de termos-chave relevantes, incluindo “machine learning”, “Amazônia”, “análise de impactos ambientais”. Essa abordagem visa abranger um amplo espectro de estudos relacionados à aplicação de técnicas de *machine learning* para analisar os impactos ambientais na região amazônica.

Foram utilizados filtros de data de publicação de 2019 a 2023 e idioma inglês e português. Como o foco na Região Amazônica, adicionamos também filtros para evitar as palavras palavra-chave “e-commerce”, “produto”, “webservice”, “Sagemaker” no intuito de evitar artigos com foco na empresa Amazon e seus produtos.

Como uma revisão sobre trabalhos que estudavam o *machine learning* na situação específica e suas contribuições, buscamos por artigos de acesso público, ou acesso público para estudo. Dessa forma, não foram abordados estudos que estavam restritos por processos de pagamento. Os critérios de pesquisa são apresentados no quadro 1.

Quadro 1. Critérios de pesquisa

Critério	Valor
Tema do trabalho	<i>Machine learning</i> na conservação da Amazonia
Termos de busca	Amazônia; Amazon; Análise de impactos ambientais; Environmental impact analysis; Machine learning
Filtro do termo de busca	E-commerce; Produto; Webservice; Sagemaker
Acesso do trabalho	Publicações de acesso aberto, ou aberto para estudo
Pergunta qualitativa	Estudos que apresentaram resultados e discussões claras sobre a aplicação de <i>machine learning</i> na análise de impactos ambientais
Ano de publicação	2019 a 2023
Idioma do texto	Português ou Inglês

Fonte: Autoral (2023).

O processo de seleção e triagem dos artigos envolveu a leitura dos títulos e resumos de acordo com os critérios de inclusão. Posteriormente, os artigos mais relevantes que atenderam a esses critérios foram submetidos a uma leitura completa para a extração de dados importantes. Os dados extraídos incluem informações sobre os métodos de *machine learning* empregados, as variáveis ambientais analisadas, os resultados obtidos e as conclusões dos estudos. Esses dados foram então sintetizados, categorizando os estudos com base em seus objetivos e abordagens metodológica. Além disso, foi feita uma avaliação crítica dos resultados obtidos e discutidas as contribuições desses estudos para a compreensão dos impactos ambientais na região Amazônica. Ao finalizar essa análise, buscou-se identificar tendências, lacunas de conhecimento e potenciais limitações associadas ao uso de *machine learning* na análise de impactos ambientais na Amazônia.

2.3. Resultados

Inicialmente, foram encontrados mais de 57,700 artigos pelo mecanismo de pesquisa adotado. Muitos dos quais relacionados à empresa Amazon, ao uso de *machine learning* em outras áreas como classificação de vida silvestre na região amazônica, otimização de execução de grafos, identificação de padrões em doenças de biomas tropicais entre outros não condizentes com este trabalho. Destes, foram selecionados 93 por sua relação com o tema “uso de *machine learning* na análise de impactos ambientais na Amazônia”.

Após minuciosa avaliação da adequação destes artigos, observando os títulos e resumos destes artigos, a variação ou predominância do foco de pesquisa do artigo entre os então selecionados, e a variação de autores para a possibilidade variação de pensamento e abordagens. Antes de continuar observamos por trabalhos que estivessem acesso restrito por pagamento como o de De Souza Jr *et al.*, 2023; outros artigos encontrados, como o trabalho de De Bem *et al.*, 2020 tem contribuições valiosas pra o assunto e o avanço científico da área, porém seu foco em *deep learning* excede o escopo desse trabalho, e não foram analisados. Assim, foram selecionados os seis artigos que são listados no quadro 2.

Quadro 2 – Banco de dados.

Autores	Título, data de publicação
Brovelli, <i>et al.</i>	Monitoring forest change in the amazon using multi-temporal remote sensing data and machine learning classification on Google Earth Engine, 2020
Dominguez, <i>et al.</i>	Forecasting amazon rain-forest deforestation using hybrid machine learning model, 2022
Larrea-Gallegos, <i>et al.</i>	Methodological Approach to Analyze Predictive Behavior of Alluvial Gold Mining Expansion in the Peruvian Amazon Using Machine Learning Approach, 2022
Maionchi, <i>et al.</i>	Estimating hourly air temperature in an Amazon-Cerrado transitional forest in Brazil using machine learning progression models, 2023
Oliveira, Petronio Diego Silva de.	Uso de aprendizado de máquina e redes neurais convulsionais profundas para a classificação de áreas queimadas em imagens de alta resolução espacial, 2019
Fernandes, <i>et al.</i>	Avaliação de Técnicas de IA para Auxiliar na Previsão de Incidência de Desmatamento na Amazônia, 2022

Fonte: Autoral (2023).

Foi então realizada leitura na íntegra da amostra, quando foram classificados e identificados de forma detalhada as principais aplicações do *machine learning* em estudos ambientais na região Amazônica, juntamente com suas inerentes limitações e potencialidades. A análise detalhada dos seis artigos selecionados revelou uma diversidade de aplicações e abordagens na utilização de *machine learning* para a análise de impactos ambientais na Amazônia.

Entre as principais aplicações identificadas estão a detecção de desmatamento (Dominguez *et al.*, 2022; Fernandes *et al.*, 2022; Larrea-Gallegos *et al.*, 2022), a previsão de mudanças na cobertura florestal (Brovelli *et al.*, 2020) e o monitoramento de alterações climáticas (Maionchi *et al.*, 2023). Cada um desses campos apresenta um conjunto único de desafios e oportunidades, demonstrando a versatilidade do *machine learning* na abordagem de questões ambientais complexas. Uma tendência notável que emergiu na análise dos artigos é o crescente uso de imagens de satélite de alta resolução (Oliveira, 2019) e dados de sensoriamento

remoto como fontes de entrada para algoritmos de *machine learning*. Esses dados permitem a criação de modelos mais precisos para a detecção de mudanças na cobertura terrestre (Brovelli *et al.*, 2020), o que é fundamental para avaliar o desmatamento e suas implicações. Além disso, o uso de técnicas de redes neurais e aprendizado profundo tem ganhado destaque (Oliveira *et al.*, 2019), permitindo a identificação automatizada de padrões complexos em imagens de satélite e a aceleração da análise de grandes conjuntos de dados.

Outro ponto relevante é a necessidade de abordagens integradas que combinem dados de diferentes fontes, como imagens de satélite, informações climáticas e registros de campo. Essa integração de dados múltiplos permite uma compreensão mais holística dos impactos ambientais na Amazônia, fornecendo informações valiosas para a tomada de decisões informadas. No entanto, os desafios de lidar com dados complexos e heterogêneos também foram destacados, demonstrando a importância de abordagens robustas de pré-processamento e análise de dados.

Em resumo, os resultados desta análise indicam que o *machine learning* desempenha um papel crucial na análise de dados relativos à conservação da Amazônia, oferecendo uma gama de aplicações e contribuindo para uma compreensão mais profunda dos desafios enfrentados por essa região crítica. A combinação de dados de sensoriamento remoto, técnicas avançadas de *machine learning* e abordagens integradas indica um avanço no uso dessas tecnologias para uma análise mais abrangente e precisa dos impactos ambientais na Amazônia, fornecendo informações valiosas para a conservação e a tomada de decisões sustentáveis.

A análise culminou na elaboração de uma síntese dos resultados obtidos, oferecendo uma visão abrangente da evolução do uso do *machine learning* na análise de impactos ambientais na região amazônica. Essa síntese objetiva contribuir para o avanço do conhecimento científico no que tange à aplicação dessa tecnologia em estudos ambientais, e na conservação do ecossistema amazônico.

2.4. Discussão

Diante dos resultados obtidos, os dados foram divididos em tópicos para serem apresentados, estes foram: as tendências no uso de *machine learning* observadas nos artigos; a potencialidade dos artigos e suas contribuições para a conservação; as limitações do *machine learning* na conservação e os desafios futuros; e, por fim, as contribuições para a ciência observadas pelo estudo dos artigos.

2.4.1. Tendências no uso do *machine learning*

A análise dos estudos selecionados revela tendências promissoras no uso de *machine learning* para a análise de impactos ambientais na Amazônia. Uma tendência significativa é o uso de algoritmos de *machine learning* para classificar cobertura terrestre e monitorar mudanças no uso da terra. Estudos como o de Grecchi *et al.* (2021) demonstraram a eficácia dessas abordagens na identificação de áreas desmatadas, o que é fundamental para a conservação da floresta amazônica, identificação de áreas de risco e formulação para ações futuras. Algoritmos de aprendizado de máquina apresentam diversas aplicações, como o “Random Forest” utilizado no trabalho de Brovelli *et al.* (2020) para criar mapas da região amazônica no Pará a fim de entender e monitorar a área de cobertura florestal. Em contra partida, o estudo De Oliveira (2019) apresentou estudo com algoritmos “Random Forest”, “Suport Vector Machine”, “K-Nearest Neighbors” e “Convolutional Neural Network” para uso na classificação de imagens com alta resolução espacial e identificação de áreas queimadas.

Outra tendência emergente é o emprego de técnicas de aprendizado profundo em combinação com imagens de satélite. Pesquisas, como a de Dominguez *et al.* (2022), destacaram a capacidade desses algoritmos em identificar automaticamente padrões em imagens de satélite, permitindo uma detecção mais rápida de eventos de desmatamento ilegal. Similarmente estudos, como o De Oliveira (2019), apontam para o uso de imagens de alta resolução de satélites para classificação de pontos de queimada, um dos maiores riscos para regiões como a Amazônia e outros ecossistemas com o avanço das alterações climáticas.

2.4.2. Potencialidades e contribuições para a conservação

Os estudos revisados enfatizam as potencialidades do *machine learning* na análise de impactos ambientais na Amazônia. A capacidade dessas técnicas em processar grandes volumes de dados de sensoriamento remoto, drones e sistemas de informações geográficas (SIGs) é crucial para uma análise abrangente da região (Larrea-Gallegos *et al.*, 2022). O *machine learning* também se mostrou valioso e bem-sucedido na identificação de padrões climáticos e na previsão de eventos futuros (Maionchi *et al.*, 2023), como mudanças climáticas e expansão do desmatamento (Dominguez *et al.*, 2022). Isso tem implicações importantes para a gestão ambiental e a tomada de decisões políticas na região amazônica.

Com os dados produzidos da utilização de *machine learning*, também é possível suplementar decisões governamentais como a “Operación Mercurio” do governo peruano, que dentre os anos de 2019 e 2020, foi responsável por uma redução de 90% do desflorestamento

filiado à exploração de ouro na região da La Pampa (MAAP # 130, 2020), que também tem impacto sobre outras áreas ambientais devido a relação da mineração fluvial como a poluição ambiental com mercúrio.

Esses estudos fornecem entendimentos valiosos sobre a dinâmica dos ecossistemas amazônicos, a distribuição de espécies, o desmatamento e as mudanças climáticas. Além disso, essas abordagens podem direcionar políticas públicas e estratégias de conservação, auxiliando na preservação da biodiversidade e no equilíbrio ambiental global. O conhecimento gerado a partir do uso de *machine learning* na Amazônia é fundamental para compreensão e combate dos desafios ambientais enfrentados nessa região e no mundo.

A capacidade dos algoritmos de *machine learning* de executar seus processamentos para gerar os próprios dados, assim não necessitando de tantos dados, os fazem uma ferramenta de apoio muito importante sobre ferramentas de processamento mais robustas como foi o caso da abordagem de Dominguez *et al.*, (2020). E embora possam ocasionalmente superestimar (Dominguez *et al.*, 2020) ou subestimar (Larrea-Gallegos *et al.*, 2022; De Oliveira, 2019) em alguma capacidade suas previsões; a margem é suficientemente pequena para que o *machine learning* seja considerado uma técnica mais do que adequada nos artigos estudados.

2.4.3. Limitações na conservação e desafios futuros

Apesar das promissoras contribuições, é importante reconhecer as limitações do uso de *machine learning* na Amazônia, conforme discutido por Brovelli *et al.* (2020), no qual o trabalho não pode validar alguns dos resultados pela falta de imagens de alta resolução gratuitas para os períodos de 2000 e 2016. A dependência de dados de qualidade é uma preocupação constante, pois a precisão dos resultados está diretamente relacionada à qualidade das informações de entrada, como apontado por Fernandes *et al.* (2022) em seu estudo de previsão de desmatamento, onde atribui os dados disponíveis e a qualidade dos mesmos como fator de grande impacto na acurácia de seu algoritmo. A limitação, de dados de poucos dados de qualidade estarem disponíveis é inequivocadamente conectada à dificuldade de coleta destes dados, sendo a Amazônia uma região de densa flora e suficientemente singular para requerer planos de coleta de dados projetados especificamente para a região.

Mesmo os estudos que consideram os modelos e técnicas bem-sucedidos, limitações são apresentadas quanto ao próprio algoritmo. Exemplo é estudo de De Oliveira (2019) que afirma não ter sido capaz de precisar qual o tempo máximo desde a queimada o sensor deve passar sobre a área para obter os resultados. Mesmo assim, em testes realizados no próprio estudo, foi

denotado uma limitação da sua técnica de diferenciar área queimada há mais de 10 dias de áreas urbanas ou asfalto, por exemplo.

Além disso, o *machine learning* exige conhecimento prévio da área de estudo e uma equipe treinada para implementar as técnicas adequadamente, como notável nos estudos de Brovelli, *et al.* (2020) e De Oliveira (2019), que utilizaram conhecimentos estatísticos e geográficos para informar e validar os algoritmos e analisar a acurácia dos resultados apresentados, introduzindo o desafio de interpretação dos resultados obtidos por algoritmos de *machine learning*. É crucial que os resultados gerados sejam validados e compreendidos em um contexto ambiental para evitar interpretações equivocadas, uma vez que a técnica não é infalível mesmo que obtenha sucesso dentro das margens aceitáveis.

2.4.4. Contribuições para a ciência

A aplicação de *machine learning* na análise de impactos ambientais na Amazônia representa uma contribuição significativa para a ciência, como importante motivador para desenvolvimento de novos modelos e algoritmos, como o caso de Li *et al.* (2023). Esses fornecem entendimentos valiosos sobre tecnologia e dinâmicas de ecossistemas, conhecimentos de conservação ambiental que podem ser aplicados sobre outros biomas e regiões. O avanço e desenvolvimento de modelos com foco em conservação também são importantes como base bibliográfica para avanços em áreas em outras áreas de aplicação, como o caso de Carvalho, 2022 que utiliza estudos como estes como base para sensoriamento remoto não vinculado à conservação.

A revisão dos estudos selecionados evidencia o potencial transformador do *machine learning* na análise de impactos ambientais na Amazônia. As tendências emergentes e as potencialidades dessas técnicas oferecem novas perspectivas para a compreensão e conservação da região, especialmente quando observamos estudos como os de Maionchi, *et al.* (2023), Larrea-Gallegos, *et al.* (2022) e De Oliveira (2019) que avaliam múltiplos modelos de *machine learning* em busca do mais adequado para uma tarefa.

No entanto, é fundamental reconhecer suas limitações e desafios, a pesquisa nesta área está em constante evolução, e a colaboração entre cientistas, autoridades ambientais e comunidades locais é essencial para garantir que o *machine learning* seja aplicado de forma ética e eficaz na Amazônia. O compromisso contínuo com o avanço da ciência e a proteção desse ecossistema vital é crucial para um futuro mais sustentável e equilibrado. Essa discussão destaca a importância de continuar a pesquisa e o desenvolvimento de técnicas de *machine*

learning adaptadas às características únicas da Amazônia, bem como de promover a conscientização sobre a necessidade de conservação da região.

2.5. Conclusão

A análise sobre o uso de *machine learning* na região Amazônica, evidenciou a versatilidade dessa tecnologia, destacando seu papel crucial na detecção de desmatamento, previsão de mudanças na cobertura florestal e monitoramento de alterações climáticas na região. A tendência do uso crescente de imagens de satélite de alta resolução e técnicas avançadas, como redes neurais e aprendizado profundo, também se destacou, impulsionando a identificação automatizada de padrões complexos. A integração de dados de múltiplas fontes foi ressaltada como uma necessidade para compreender de forma holística os impactos ambientais na Amazônia, apontando para uma valiosa contribuição do *machine learning* na tomada de decisões informadas para a conservação.

Durante a extensão do trabalho, foram encontrados inúmeros trabalhos com mesmo interesse na região amazônica e sua conservação que se aprofundavam em outras técnicas que não eram foco do estudo, como *deep learning*, cujo uso e impacto na Amazônia seria um ótimo foco para estudos futuros. Não apenas, a extensão do trabalho para analisar de estudos em espanhol, considerando que a Amazônia também abrange outros países da América Latina, ou em conjunto com outras instituições de pesquisa também traz oportunidade de enriquecer os resultados deste artigo.

Foram também reconhecidos desafios como a dependência de dados de qualidade, que não foram coletados ou não são facilmente acessíveis; a necessidade de interpretação dos resultados; e a exigência de conhecimento especializado para implementar adequadamente essas técnicas. Os estudos revisados oferecem perspectivas valiosas sobre a dinâmica dos ecossistemas amazônicos, reforçando o potencial transformador do *machine learning* na análise ambiental e ressaltando sua relevância na formulação de políticas e estratégias de conservação. Essa análise evidencia não apenas a importância de avançar nas técnicas de *machine learning* adaptadas à Amazônia, mas também a necessidade contínua de colaboração entre cientistas, autoridades ambientais e comunidades locais para assegurar uma aplicação ética e eficaz dessas tecnologias na preservação deste ecossistema crucial para um futuro sustentável.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, A. et al. **A expansão da fronteira agropecuária e o desmatamento na Amazônia brasileira.** Estudos Avançados, v. 32, n. 92, p. 113-126, 2018.

ARRUDA, Daniel M. et al. **Vegetações amazônicas e terras indígenas ameaçadas pelas próximas mudanças climáticas: Previsão de impacto nos biomas brasileiros.** *Austral Ecology*, 2023. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/aec.13369>>, Acesso em: 30, novembro de 2023.

BELLARD, C. et al. **Will Climate Change Promote Future Invasions?** *Global Ecology and Biogeography*, v. 21, n. 8, p. 977-988, 2012.

BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. Amazon Rainforest. *Encyclopedia Britannica*, 3 Dec. 2023. Disponível em: <https://www.britannica.com/place/Amazon-Rainforest>. Acesso em: 4 December 2023.

BROVELLI, Maria Antonia; SUN, Yaru; YORDANOV, Vasil. **Monitoring forest change in the amazon using multi-temporal remote sensing data and machine learning classification on Google Earth Engine.** *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 9, n. 10, p. 580, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2220-9964/9/10/580>>, Acesso em: 30, novembro de 2023.

CARVALHO, Osmar Luiz Ferreira de. **Deep learning & remote sensing: pushing the frontiers in image segmentation.** 2022. xviii, 146 f., il. Dissertação (Mestrado em Informática) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/45324>>, Acesso em: 30, novembro de 2023.

DO VALE JÚNIOR, José Frutuoso et al. **Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável.** *Revista Agro@ambiente On-line*, v. 5, n. 2, p. 158-165, 2011.

DOMINGUEZ, David et al. **Forecasting amazon rain-forest deforestation using a hybrid machine learning model.** *Sustainability*, v. 14, n. 2, p. 691, 2022.

FERNANDES, B.; OSSES, J.; FAÇANHA, R. Avaliação de Técnicas de IA para Auxiliar na Previsão de Incidência de Desmatamento na Amazônia. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 7, n. 2, p. 57-64, 15 jul. 2022. Disponível em: <<http://revistas.poli.br/~anais/index.php/repa/article/view/2218/823>>, Acesso em: 30, novembro de 2023.

GOMES, V.H., IJFF, S.D., RAES, N. et al. **Species Distribution Modelling: Contrasting presence-only models with plot abundance data.** *Scientific Reports* 8, 1003 (2018). Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-017-18927-1>>. Acesso em: 2, dezembro de 2023.

GOMES, V.H., VIEIRA, I.C.G., SALOMÃO, P. R., TER STEGEE, H. **Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change.** *Nature Climate Change* 9, 547-553 (2019). Disponível em: <<https://www.amazoniasocioambiental.org/wp-content/uploads/2019/06/Amazonian-tree-species-threatened....pdf>>. Acesso em: 2, Dezembro de 2023.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep Learning.** MIT Press, 2016.

GRECCHI, R. C. et al. **Assessing the use of machine learning to predict crop production in the Brazilian Amazon.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 103, p. 102502, 2021.

GUIMARÃES, F. R. et al. **Land Cover Classification of the Brazilian Amazon using Multi-Resolution Time Series Sentinel-2 Data and Machine Learning Algorithms.** *Remote Sensing*, v. 13, n. 6, p. 1073, 2021.

KELLEHER, J., MAC NAMEE, B., D'ARCY, A. **Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics: Algorithms, Worked Examples, and Case Studies**. 2ª Ed. Cambridge: MIT Press, 2020.

LARREA-GALLEGOS, Gustavo et al. **Methodological Approach to Analyze Predictive Behavior of Alluvial Gold Mining Expansion in the Peruvian Amazon Using a Machine Learning Approach**. Available at SSRN 4147730, 2022. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4147730>, Acesso em: 30, novembro de 2023.

LI, F. et al. **AttentionFire_v1.0: interpretable machine learning fire model for burned-area predictions over tropics**. *Geosci. Model Dev.*, 16, 869–884, Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/gmd-16-869-2023>>, Acesso em: 30, novembro de 2023.

MAAP #130: Illegal Gold Mining Down 78% in Peruvian Amazon, But Still Threatens Key Areas. **Monitoring of the Andean Amazon Project**, 2020. Disponível em: <<https://www.maaproject.org/2020/gold-mining-peru/>>. Acesso em: 30, Novembro e 2023.

MAIA, A. A. et al. **Assessing the ability of machine learning algorithms to map smallholder agriculture in the Brazilian Amazon using high spatial resolution satellite imagery**. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 94, p. 102213, 2020.

MAIONCHI, Daniela et al. **Estimating hourly air temperature in an Amazon-Cerrado transitional forest in Brazil using machine learning regression models**. 2023. Disponível em: <<https://www.researchsquare.com/article/rs-3414339/v1>>, Acesso em: 30, novembro de 2023.

MAHESH, Batta. **Machine learning algorithms-a review**. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344717762_Machine_Learning_Algorithms_-_A_Review>, v. 9, p. 381-386, 2020.

MARENCO, José A., SOUZA JUNIOR, C. **Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo: ALANA, 2018.

MOURA, Yhasmin Mendes de et al. **Carbon dynamics in a human-modified tropical forest: a case study using multi-temporal LiDAR data**. *Remote Sensing*, v. 12, n. 3, p. 430, 2020.

NASCIMENTO, JS do, Junior, CS dos S., Monteiro, MJG, Lopes, PVN, & Silva, YP da. **Monitoramento ambiental Impactos ambientais movidos pelo desmatamento sucessivo da amazônia legal / Monitoramento ambiental Impactos ambientais movidos pelo desmatamento sucessivo da Amazônia legal**. *Brazilian Journal of Development*, v. 5 n.12, pg. 33157–33167, 2019.

NEPSTAD, Daniel et al. **Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains**. *Science*, v. 344, n. 6188, p. 1118-1123, 2014.

NOBRE, Carlos A. et al. **Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016.

OLIVEIRA, Petronio Diego Silva de. **Uso de aprendizagem de máquina e redes neurais convolucionais profundas para a classificação de áreas queimadas em imagens de alta resolução espacial**. 2019. viii, 23 f., il. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/38234>> Acesso em: 20 novembro de 2023.

- PEREZ, Leticia Palazzi et al. **Climate change and disasters: analysis of the Brazilian regional inequality**. Sustainability in Debate, v. 11, n. 3, p. 260-296, 2020.
- RAZAFINDRAKOTO, M. et al. **A scoping review of the use of artificial intelligence and machine learning in biodiversity conservation**. Scientific Reports, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2020.
- ROSAN, T. M. et al. **Machine learning as a tool for predicting deforestation: a case study in the Amazon**. Journal of Land Use Science, v. 16, n. 3, p. 335-352, 2021.
- RUDKE, Anderson Paulo et al. **Impact of mining activities on areas of environmental protection in the southwest of the Amazon: A GIS-and remote sensing-based assessment**. Journal of environmental management, v. 263, p. 110392, 2020.
- RUSSELL, Stuart J. **Artificial intelligence a modern approach**. Pearson Education, Inc., 2010.
- SHIMABUKURO, Yosio Edemir et al. **Mapeamento do desmatamento e degradação florestal no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira, utilizando imagens fração derivadas das imagensOLI do Landsat-8**. 2020.
- SHIMABUKURO, Y.E.; DUTRA, C. A.; ARAI, E.; SANTOS, E.; MOURA, Y.; DUARTE, V. **Mapeamento do desmatamento e degradação florestal no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira, utilizando imagens fração derivadas das imagensOLI do Landsat-8**. In: FELSEMBURGH, Cristina (Org.). A Produção do Conhecimento na Engenharia Florestal. 1ª Ed. – Ponta Grossa: Atena Editora, 2020. P. 24-38
- SOUZA JR, Carlos M. et al. **Ten-year Landsat classification of deforestation and forest degradation in the Brazilian Amazon**. Remote Sensing, v. 5, n. 11, p. 5493-5513, 2013.
- TER STEEGE, H., PRADO, P.I., LIMA, R.A.F.d. et al. **Biased-corrected richness estimates for the Amazonian tree flora**. Scientific Reports 10, 10130 (2020). Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-020-66686-3>>. Acesso em: 3, dezembro de 2023.
- THEOBALD, O. **Machine Learning for Absolute Beginners: A Plain English Introduction**. 2nd Ed – [S.I.]. Scatterplot Press, 2017.
- VASCONCELOS, M. J. et al. **Limitations and challenges of machine learning in ecological models**. Ecological Modeling, v. 411, p. 108827, 2020.