

Ambientalização dos recursos hídricos na Amazônia brasileira orientada pela inteligência artificial

Environmentalization of water resources in the Brazilian Amazon guided by artificial intelligence

Ambientalización de los recursos hídricos en la Amazonía brasileña guiada por la inteligencia artificial

Recebido: 21/05/2022 | Revisado: 31/05/2022 | Aceito: 11/06/2022 | Publicado: 17/06/2022

Walber Lopes de Abreu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1021-5462>
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil
E-mail: walber.abreu@ifpa.edu.br

Luís Alberto Basso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1014-8039>
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: luis.basso@ufrgs.br

Denis Carlos Lima Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3207-6934>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil
E-mail: denis.costa@ifpa.edu.br

Resumo

A Região Hidrográfica Amazônica apresenta um panorama de acentuada fragilidade organizacional dos setores públicos relacionados à Governança da Água e da Ameaça Hídrica. A necessidade de um sistema de Gestão Integrada e Participativa dos Recursos Hídricos e a setorização de políticas públicas contribuem para um contexto de insustentabilidade ambiental para a Gestão Hídrica. Assim, a ambientalização dos Recursos Hídricos e a regência da Água configuram a factual Gestão Territorial dos Recursos Hídricos. O objetivo deste artigo é demonstrar o processo de ambientalização dos Recursos Hídricos e governança da Água na Amazônia Brasileira a partir da operacionalização do Índice de ambientalização dos Recursos Hídricos na Amazônia Brasileira. Este método foi constituído a partir da implementação de uma Inteligência Artificial baseada em Árvore de Decisão. Essa estratégia beneficiou-se de dados do Índice de Ameaça Hídrica, percentual de desmatamento, percentual de barragens e percentual de áreas destinadas à agricultura comercial, resultando em um modelo de tomada de decisão capaz de auxiliar o desenvolvimento regional dos países Amazônicos.

Palavras-chave: Hidrografia; Amazônia; Gestão hídrica; Inteligência artificial.

Abstract

The Amazon Hydrographic Region presents a panorama of marked organizational fragility of the public sectors related to the Governance of Water and the Water Threat. The need for an Integrated and Participatory Management System for Water Resources and the sectorization of public policies contribute to a context of environmental unsustainability for Water Management. Thus, the environmentalization of Water Resources and the regency of Water configure the actual Territorial Management of Water Resources. The objective of this article is to demonstrate the process of environmentalization of Water Resources and Water governance in the Brazilian Amazon from the operationalization of the Environmentalization Index of Water Resources in the Brazilian Amazon. This method was constituted from the implementation of an Artificial Intelligence based on a Decision Tree. This strategy benefited from data from the Water Threat Index, percentage of deforestation, percentage of dams and percentage of areas destined for commercial agriculture, resulting in a decision-making model capable of assisting the regional development of Amazonian countries.

Keywords: Hydrography; Amazon; Water management; Artificial intelligence.

Resumen

La Región Hidrográfica Amazónica presenta un panorama de marcada fragilidad organizativa de los sectores públicos relacionados con la Gobernanza del Agua y la Amenaza Hídrica. La necesidad de un Sistema de Gestión Integrado y Participativo de los Recursos Hídricos y la sectorización de las políticas públicas contribuyen a un contexto de insostenibilidad ambiental para la Gestión del Agua. Así, la ambientalización de los Recursos Hídricos y la regencia del Agua configuran la actual Gestión Territorial de los Recursos Hídricos. El objetivo de este artículo es demostrar el proceso de ambientalización de los Recursos Hídricos y la Gobernanza del Agua en la Amazonía brasileña a partir de la operacionalización del Índice de Ambientalización de los Recursos Hídricos en la Amazonía brasileña. Este método

se constituyó a partir de la implementación de una Inteligencia Artificial basada en Árbol de Decisión. Esta estrategia se benefició de datos del Índice de Amenaza Hídrica, porcentaje de deforestación, porcentaje de represas y porcentaje de áreas destinadas a la agricultura comercial, resultando en un modelo de toma de decisiones capaz de asistir al desarrollo regional de los países amazónicos.

Palabras clave: Hidrografía; Amazonas; Administración del Agua; Inteligencia artificial.

1. Introdução

A questão da Água tornou-se estratégica para os mercados globais e o desenvolvimento regional das nações. O construto político-espacial das relações geopolíticas globais associado às mudanças climáticas exerce uma forte pressão sobre os recursos hídricos e o conjunto das bacias hidrográficas mundiais.

O Brasil assume importância estratégica nesse cenário global, considerando as suas condições geográficas de tropicalidade, sub-tropicalidade e disponibilidade de recursos naturais e serviços ambientais estratégicos, em particular, de biomassa, água e fotossíntese. Não obstante deste cenário, dentre as regiões brasileiras, a Amazônia ocupa o centro das atenções do mundo capitalista contemporâneo por concentrar exatamente sistemas ambientais complexos.

A Amazônia brasileira assume a condição ímpar de uma “*Frente Hídrica Nacional/Transfronteiriça*” (FHNT) que é estratégica para o desenvolvimento político, econômico e social do país, a partir de novos contornos e significado geopolítico proporcionados pelo lançamento do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) e do Plano Estratégico de Integração Sul-Americana – IIRSA (Fearnside et al, 2019).

A tropicalidade amazônica possui qualidades naturais e humanas que caracterizam o patrimônio da sociobiodiversidade existente (fotossíntese, água, biomassa, diversidade biológica, patrimônio cultural dos povos) marcado pela “Cultura da Floresta Tropical” que, secularmente, é mantida pelos povos das águas e das florestas há mais de 12 mil anos. Estas qualidades são essenciais para a sustentabilidade do ecossistema global/local, em particular, o amazônico que é uno e diverso (Ghafoori-Kharanagh et al, 2021).

A necessidade de se elaborar uma nova política institucional de regulação de acesso e usos múltiplos da água que atendesse as novas demandas em curso no Brasil, em particular na Amazônia, tornou-se uma questão política de governos que se sucederam, e não a transformaram numa questão política de Estado, relegando assim, a um segundo plano, a gestão dos recursos hídricos e de seus instrumentos legais. Após, aproximadamente, 20 anos da Política Nacional de Recursos Hídricos, os estados da Amazônia brasileira não efetivaram a implantação dos marcos legais da referida lei das águas na sua totalidade (PNREH - Lei nº 9.433/1997).

Deste modo, o presente artigo versa sobre a temática da ambientalização dos Recursos Hídricos na Amazônia Brasileira (ARHAB), constituindo uma abordagem geográfica acerca da Política de Governança Territorial da Água no Brasil e sua relação com a “Nova Geografia das Águas” na Amazônia brasileira. Para isso, considera-se a que gestão integrada de recursos hídricos no Brasil tornou-se um grande desafio para os gestores, ambientalistas, sociedade civil, poder público, universidades e institutos federais, centros de pesquisas, entre outras entidades. Dessa forma, propõem-se que a aplicação de uma estratégia fundamentada em Inteligência Artificial (IA) é essencial ao desenvolvimento científico e tecnológico das práticas dessa gestão. Com essa metodologia, é possível assimilar, ao estudo, um número maior de variáveis, a fim de beneficiar a sociedade e as instituições, sobre a tomada de decisão, visando elencar a ordem de prioridades dos principais instrumentos de gestão para sua ótima implantação e excepcional desenvolvimento.

2. Sustentação Teórica

Existem muitos trabalhos acadêmicos nos institutos de pesquisa e ensino, universidades, entre outros, baseados na elaboração de produtos com agregação de valor e inovação tecnológica (Abreu, 2017; Santos e Quinteiro, 2018; Machado et al,

2021). Todavia, essas pesquisas não realizaram uma análise de regressão múltipla com a finalidade de correlacionar o impacto das variáveis intrínsecas ao fenômeno hídrico avaliado.

Na transição do século XX para o século XXI, na América Latina e o Brasil, novos empreendimentos empresariais, programas e projetos da ação pública surgiram com maior vigor e dinamismo econômico, objetivando alcançar regiões desenvolvidas e interioranas do Centro-Oeste, Nordeste e Amazônia para diversificar a matriz energética no país. A criação de hidrelétricas e pequenas centrais hidrelétricas em território nacional, indubitavelmente, aumentou os impactos sobre os recursos hídricos de acordo com novas demandas de uso e acesso (Ferreira, 2020).

O desenvolvimento de atividades produtivas sobre o meio aquático resulta em inúmeras práticas insustentáveis de usos da água nos diversos continentes, que refletem a fragilidade da governança da água ou crise de gestão hídrica, considerada um dos maiores problemas da humanidade na atualidade (Ghafoori-Kharanagh et al, 2021).

Ferreira et al. (2017) consideram que a gestão deveria primar por uma visão mais integrada, holística e multicriterial do processo, com a participação social, ancorada numa concepção sistêmica multi e intersetoriais do gerenciamento.

A fronteira amazônica na atualidade compreende a abertura de espaços territoriais com novas frentes de expansão econômica associadas a *comoditização* da economia. Estas, por sua vez, implicam em novos processos sociais e econômicos decorrentes da expansão da atividade agropecuária, minerária e energética sob o paradigma do neo-extrativismo (Silva, 2015).

Segundo Teisserenc et al., (2020) a água é um recurso territorial inerente à formação de espaços territoriais ocupados por populações que dele necessitam e garantem a reprodução de seus diferentes modos de vida, sendo, portanto, fundamental para a manutenção da vida como direito humano que representa.

Os impactos socioambientais sobre os recursos hídricos são evidentes pelos múltiplos usos que deles fazem (irrigação, piscicultura, pesca, balneabilidade, agricultura, agronegócio, hidronegócio, hidrelétricas, pecuária, indústrias, comércio, turismo) dado seu elevado potencial hídrico e índice de vazão, rica sociobiodiversidade, suas influências no sistema hidrográfico estuarino e oceânico, entre outros (Melo et al, 2020).

Para Rocha e Santos (2018), o índice de vazão é a razão entre a vazão média em uma dada seção de medição e a respectiva área de drenagem. Esse índice é fundamental para aferir as alterações nos padrões espaciais.

Costa et al (2016) sugerem uma seção de segurança, para operações de geração termoeétrica a gás natural, baseada em *Árvore de Decisão*. Fundamentados na estratégia de Computação Bioinspirada (CBI), obtidos pela *Árvore de Decisão*, foi possível otimizar o despacho integrado do sistema elétrico de potência, reduzindo consideravelmente os impactos ambientais no ecossistema.

Costa et al (2020) apresentam o Processo de Modelagens Matemática e Computacional (PM₂C) aplicado na determinação dos critérios responsáveis pela localização de áreas indicadas à instauração de aterros sanitários. Por meio de modelos matemáticos os autores conseguiram viabilizar n variáveis com n possibilidades de tomada de decisão.

Esse artigo apresenta uma proposta em que, a estratégia de Inteligência Artificial foi implementada em um *dataset* de recursos hídricos. Essa metodologia, Bioinspirada, beneficia-se de modelos matemáticos destinados a uma estimação segura e precisa para a tomada de decisão da gestão hídrica.

3. Metodologia

A estruturação executada neste artigo é, majoritariamente, estruturalista, consoante com Pereira et al (2018). A investigação é instituída com a análise de um fenômeno real. A seguir, amplifica-se o espaço da abstração por intervenção dos métodos estatísticos e computacionais. Caracteriza-se o propósito científico e, finalmente, evidencia-se o resultado da pesquisa, combinada às informações *a priori* factuais, idealizadas e correlacionadas às condições e restrições, sociais, ambientais e econômicas.

As fases categorizadas da metodologia utilizada nesse trabalho estão evidenciadas na Modelagem Matemática-Computacional (MMC).

3.1 Análise matemática

A Insegurança Hídrica é um indicador que se refere à problemática ambiental da água causada por atividades impactantes que afetam diretamente os recursos hídricos que interferem na dinâmica do clima global e o comprometimento da sóciobiodiversidade. A construção do Índice de Ameaça Hídrica (IAH) se dá por conta da existência de três atividades que impactam o território amazônico, tais como: o desmatamento, a construção de barragens (hidrelétricas e rejeitos de mineração) e agricultura comercial, cujos dados estão apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3, referem-se aos Estados da Região Norte do Brasil.

A Tabela 1 apresenta o percentual de cada Estado da Amazônia em relação à quantidade total das barragens. A Tabela 2 apresenta, entre 2015 e 2020, a área desmatada. A Tabela 3 mostra a distribuição das áreas de cobertura vegetal e uso da terra nos sete Estados estudados. A partir da análise desse conjunto de dados foi possível modelar, mediante o processo de Regressão Múltipla Não-Linear, as seguintes relações funcionais: $IAH = f(\text{desmatamento})$; $IAH = f(\text{barragens})$; $IAH = f(\text{agric. comercial})$. As Equações (1), (2) e (3) exibem, respectivamente, as relações funcionais com os seus valores da precisão dos ajustes.

$$IAH = -68,559d^3 + 51,495d^2 - 5,9977d + 0,2437; p = 97,41\% \quad (1)$$

$$IAH = 0,0905e^{6,9982b}; p = 96,35\% \quad (2)$$

$$IAH = 3,1973a^2 + 1,1402a + 0,1098; p = 98,05\% \quad (3)$$

Em que, $IAH \rightarrow$ índice de ameaça hídrica; $d \rightarrow$ percentual de desmatamento; $b \rightarrow$ percentual de barragens; $a \rightarrow$ percentual de áreas destinadas à agricultura comercial; $p \rightarrow$ valor da precisão dos ajustes.

As relações entre as variáveis independentes d, b, a , com a variável dependente IAH apresentam comportamentos distintos: $IAH = f(d)$ é dada por uma relação cúbica; $IAH = f(b)$ é dada por uma relação exponencial e $IAH = f(a)$ é dada por uma relação quadrática. Esse sistema de relações não-lineares ratificam a complexidade das análises. Não se pode afirmar, com base nas relações apresentadas, qual o grau de importância das variáveis independentes, e conseqüentemente, qual a ordem de prioridade na tomada de decisão. Dessa forma, uma estratégia de Computação Bioinspirada foi aplicada para realçar o fenômeno da Ambientalização dos Recursos Hídricos na Amazônia Brasileira (ARHAB).

Tabela 1: Distribuição da quantidade absoluta e relativa de Barragens de rejeitos e Usinas Hidrelétricas

Estado	Barragens de Rejeitos		Usinas Hidrelétricas		PCH		Total	
	n	%	n	%	n	%	n	%
Pará	105	59,7%	24	31,2%	6	11,1%	135	44,0%
Amapá	14	8,0%	9	11,7%	0	0,0%	23	7,5%
Acre	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
Amazonas	15	8,5%	12	15,6%	0	0,0%	27	8,8%
Rondônia	36	20,5%	4	5,2%	25	46,3%	65	21,2%
Roraima	0	0,0%	5	6,5%	1	1,9%	6	2,0%
Tocantins	6	3,4%	23	29,9%	2	3,7%	51	16,6%
Total	176	57,3%	77	25,1%	54	17,6%	307	100,0%

Fonte: ANM, ANEEL e EPE (2021).

Tabela 2 – Distribuição da quantidade de Área Desmatada por bioma entre 2015-2020

Estado	Área Desmatada												Total (km ²)	
	2015		2016		2017		2018		2019		2020		%	n
	N	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	%	n
Pará	2.281,54	11,8%	2.745,84	14,3%	2.563,65	13,3%	2.668,88	13,9%	4.463,04	23,2%	4.532,14	23,5%	19.255,09	51,5%
Amapá	18,6	16,7%	12,18	10,9%	16,71	15,0%	23,67	21,2%	39,05	35,0%	1,4	1,3%	111,61	0,3%
Acre	222,6	8,7%	364,55	14,3%	245,65	9,6%	461,1	18,0%	706,75	27,7%	554,67	21,7%	2.555,32	6,8%
Amazonas	685,36	10,4%	1.002,22	15,2%	1.009,07	15,3%	1.062,28	16,1%	1.556,20	23,5%	1.299,44	19,6%	6.614,57	17,7%
Rondônia	960,46	13,2%	1.192,84	16,4%	1.278,26	17,5%	1.225,44	16,8%	1.400,96	19,2%	1.232,31	16,9%	7.290,27	19,5%
Roraima	152,59	10,4%	226,76	15,4%	121,71	8,3%	129,43	8,8%	543,35	36,9%	299,99	20,4%	1.473,83	3,9%
Tocantins	15,95	23,9%	18,27	27,4%	12,74	19,1%	6,33	9,5%	9,95	14,9%	3,49	5,2%	66,73	0,2%
Total (km²)	4.337,10	11,6%	5.562,66	14,9%	5.247,79	14,0%	5.577,13	14,9%	8.719,30	23,3%	7.923,44	21,2%	37.367,42	100,0%

Fonte: Terrabrasilis (2021).

Tabela 3: Distribuição da área das classes de cobertura vegetal e uso da terra destinadas a atividade de agricultura comercial

Estado	Área Agrícola (km ²)		Pastagem com manejo (km ²)		Área Total (km ²)	
	n	%	n	%	n	%
Pará	9.334,4	33,0%	159.703,6	50,7%	169.038,0	49,3%
Amapá	193,1	0,7%	145,4	0,0%	338,4	0,1%
Acre	21,7	0,1%	13.290,3	4,2%	13.312,0	3,9%
Amazonas	83,4	0,3%	8.570,1	2,7%	8.653,5	2,5%
Rondônia	3.760,1	13,3%	71.612,2	22,7%	75.372,3	22,0%
Roraima	700,5	2,5%	1.458,9	0,5%	2.159,4	0,6%
Tocantins	14.212,0	50,2%	60.008,0	19,1%	74.220,0	21,6%
Total	28.305,3	8,3%	314.788,3	91,7%	343.093,6	100,0%

Fonte: IBGE, (2020).

3.2 Inteligência artificial

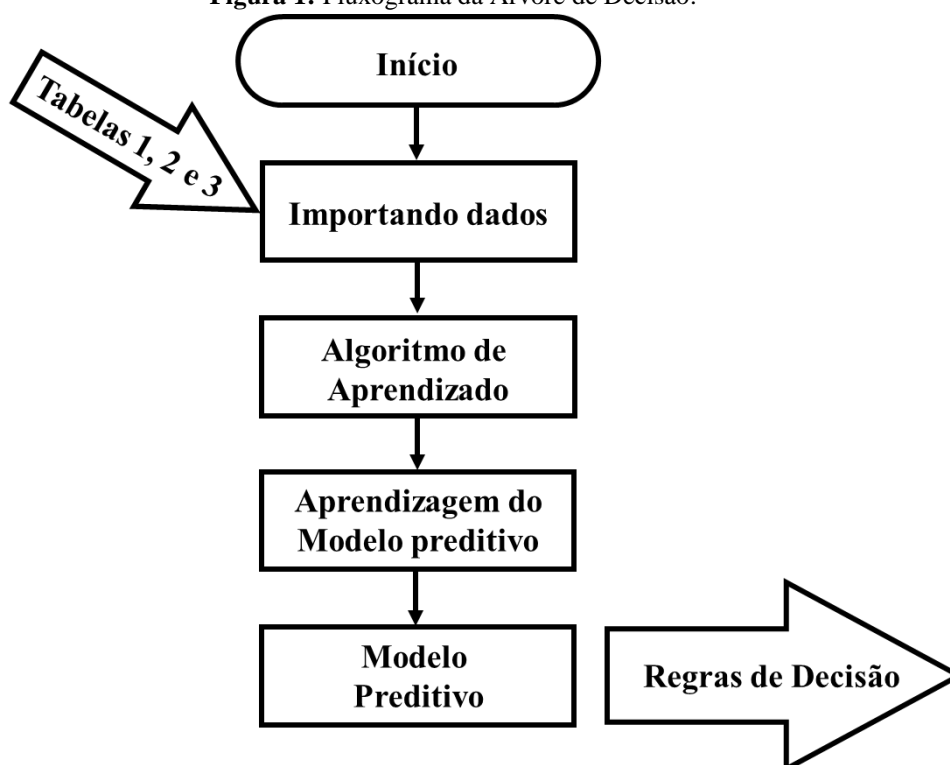
Os processos de simulação computacional podem ser implementados em diversas linguagens de programação. Costa et al (2019) recomendam o desenvolvimento de modelos computacionais em linguagem PYTHON de programação. Azancort et al (2021) utilizaram a linguagem orientada a bloco na composição de árvore de decisão para estudar fenômenos relacionados às variáveis ambientais. Costa et al (2021) consideram que a linguagem de programação MATLAB é a mais robusta à modelagem computacional.

Este trabalho desenvolveu um modelo estabelecido em Computação Bioinspirada, a fim de empregar uma estratégia de Inteligência Artificial, estruturada em Árvore de Decisão. O *software* usado na modelagem foi o *RapidMiner Studio*, versão 9.10.001 (RapidMiner, 2021).

A Árvore de Decisão (AD) é uma área da Ciência da Computação inspirada na natureza. A AD é uma técnica bastante eficiente e amplamente utilizada em problemas de classificação. Uma das principais qualidades dessa técnica define que o conhecimento adquirido, por essa IA, pode ser representado por meio de regras. Essas regras são expressas em linguagem natural, o que facilita o entendimento por parte de especialista humano, proporcionando prescrições à tomada de decisão (Costa, HAO, 2021).

A Figura 1 exibe o fluxograma do algoritmo utilizado no treinamento da Árvore de Decisão, aplicada nesta pesquisa.

Figura 1: Fluxograma da Árvore de Decisão.



Fonte: Autores.

Esse algoritmo, mostrado na Figura 1, foi escrito no *software RapidMiner*, obedecendo os cálculos de entropia, ganho de informação, razão de ganho e valor de Gini. Essas etapas estão relacionadas ao algoritmo CART - *Classification and Regression Tree*, aplicado por Costa et al (2016).

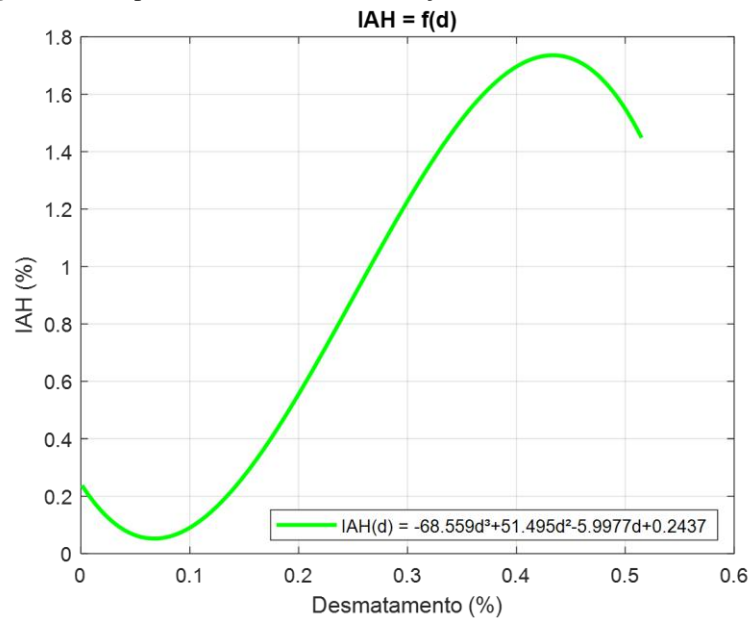
O Modelo de Computação Bioinspirada, aplicado por Costa et al (2016), está vinculado às teorias de Árvore de Decisão (AD). Essa estratégia apresenta como uma das principais características a interpretabilidade do conhecimento aprendido a partir

de uma base de dados. A Árvore de Decisão, diferentemente, dos mecanismos usuais, é capaz de encontrar os atributos críticos e seus limites diretamente de um *dataset* utilizando simulações *offline*. Os limites encontrados não apenas ajudam a construir um modelo de predição, mas também criam zonas de segurança para a gestão pública planejar as melhores ações de controle, com a intenção de garantir a estabilidade dos recursos hídricos.

4. Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta a variação do IAH em relação ao índice de desmatamento. O modelo cúbico destaca dois pontos de inflexão emblemáticos: ponto máximo, dado pelo par $d = 0.431$ e $IAH = 1.73542$; ponto mínimo, dado pelo par $d = 0.068$ e $IAH = 0.0524121$. Esses pontos indicam que O IAH alterna entre comportamentos crescente de decrescente, conforme varia o nível do desmatamento.

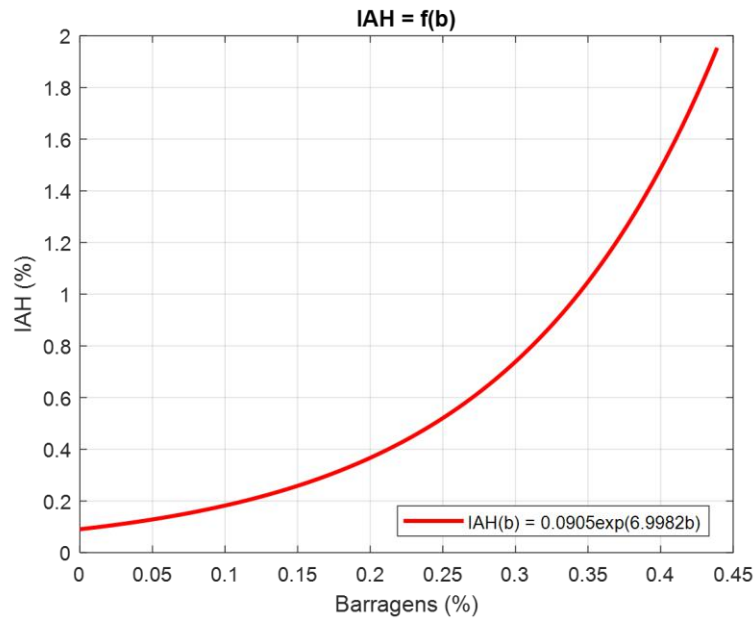
Figura 2: Comportamento do IAH em função do nível de desmatamento.



Fonte: Autores.

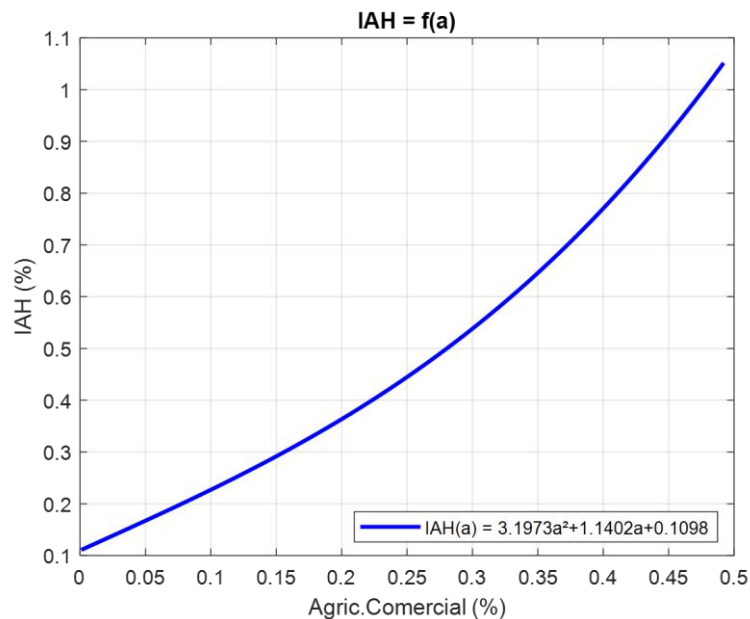
A Figura 3 destaca que a relação entre IAH e o percentual de barragens é dado por um modelo exponencial crescente. Ou seja, a taxa de expansão do IAH é padronizada em função do aumento do percentual de barragens; e a redução do IAH, varia com a mesma taxa exponencial, influenciada pela redução do percentual de barragens.

Figura 3: Comportamento do IAH em função do percentual de barragens.



A Figura 4 indica que a relação entre o IAH e o nível de área agrícola comercial é dado por um modelo quadrático. Essa parábola com concavidade voltada para cima. Essa relação mostra que o IAH e o índice de área agrícola comercial possuem o mesmo sentido de variação. Ou seja, o crescimento do índice de área agrícola comercial produz um aumento no IAH. Da mesma forma que, a redução do índice de área agrícola comercial produz uma diminuição no IAH.

Figura 4: Comportamento do IAH em função do percentual de área agrícola comercial.



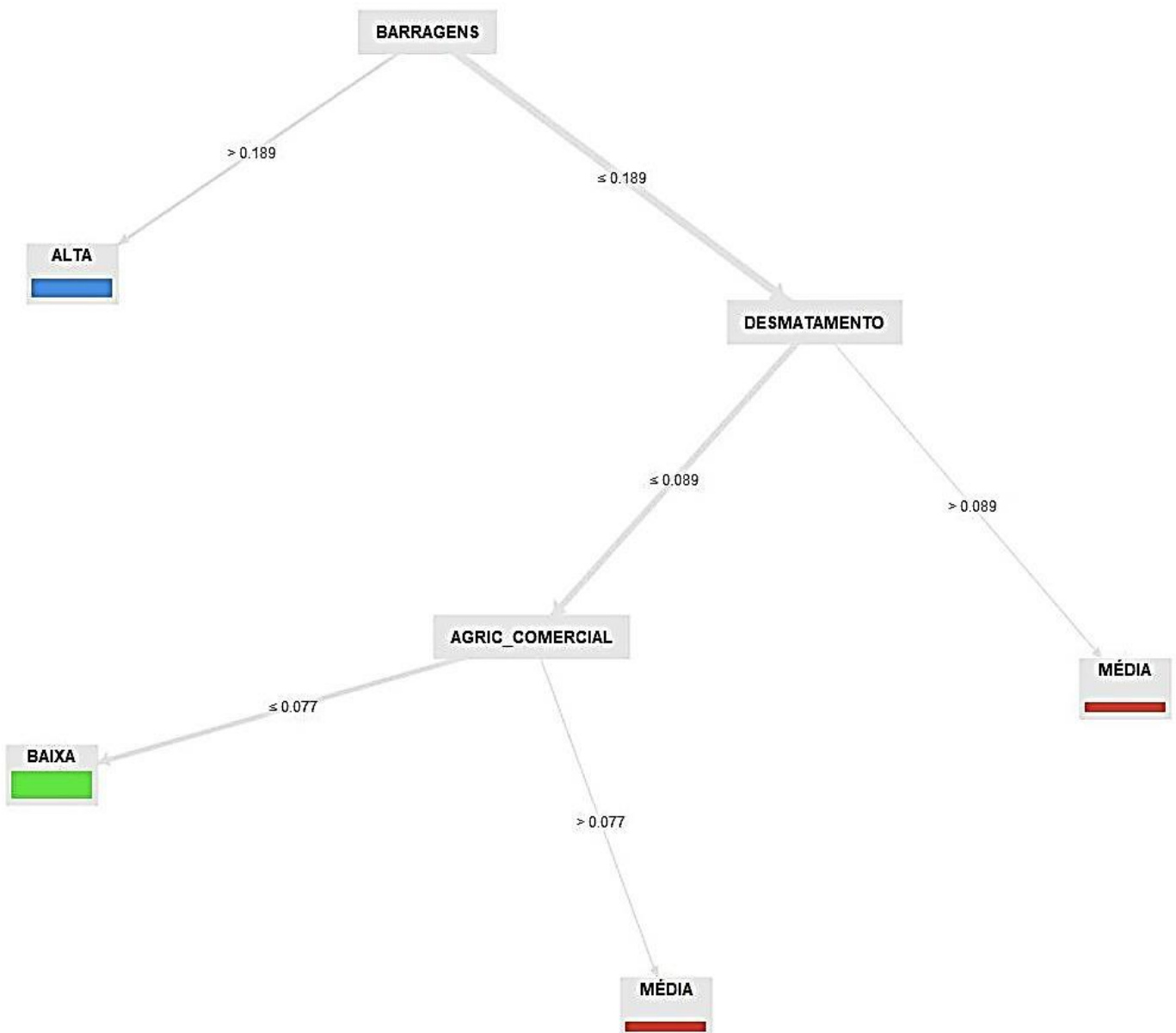
Esse trabalho fundamentou-se nos princípios dos Algoritmos de Aprendizado de Máquina (AAM). Esses algoritmos são frequentemente utilizados em problemas com uma grande quantidade de dados, os *BigData*. O AAM é capaz de adaptar-se automaticamente em ambientes dinâmicos, pois são embasados em Complexidade Computacional, Estatística, Psicologia,

Probabilidade, Neurociência, Neurolinguística, Teoria de Controle e Teoria da Informação. A aglutinação de todas essas áreas é fundamental à implementação de uma eficiente Inteligência Artificial.

Esta pesquisa considera que a Modelagem Computacional deveria ser implementada a partir dos conceitos da Árvore de Decisão (AD). A AD é uma das categorias do AAM capaz de produzir interpretabilidade do conhecimento adquirido, baseado nos *BigData*. A Árvore de Decisão é um sistema inteligente que cria estruturas simbólicas que normalmente não são compreensíveis em virtude da magnitude dos dados

A Figura 5 mostra o resultado do padrão reconhecido pela Computação Bioinspirada denominada Árvore de Decisão. A AD produz um conjunto de regras de decisão, construído por sucessivas divisões dos exemplos, de acordo com os valores de seus atributos. Esse processo é denominado particionamento recursivo.

Figura 5: Árvore de Decisão que descreve o $IAH = f(d, b, a)$.



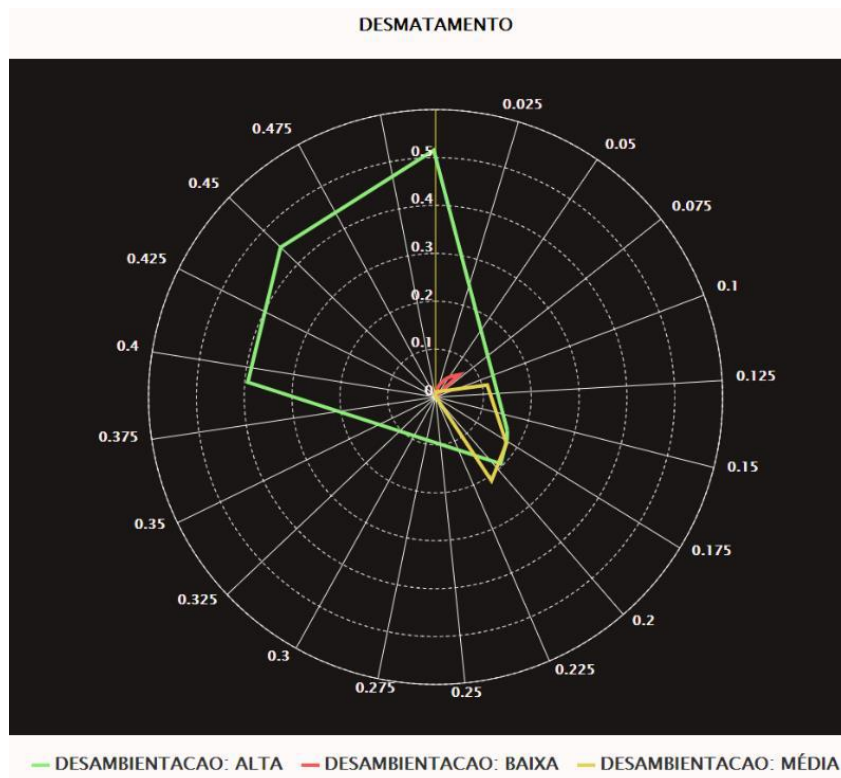
Fonte: Autores.

A estrutura indica que a principal variável de controle do IAH é o percentual de barragens. E que, para um IAH baixo é necessário que os seguintes critérios sejam obedecidos:

- I. percentual de barragem ≤ 0.189 ;
- II. percentual de desmatamento ≤ 0.089 ; de área agrícola comercial ≤ 0.077 .

A Figura 6 apresenta a probabilidade para se definir o nível de desambientação, considerando o índice de desmatamento como principal causa.

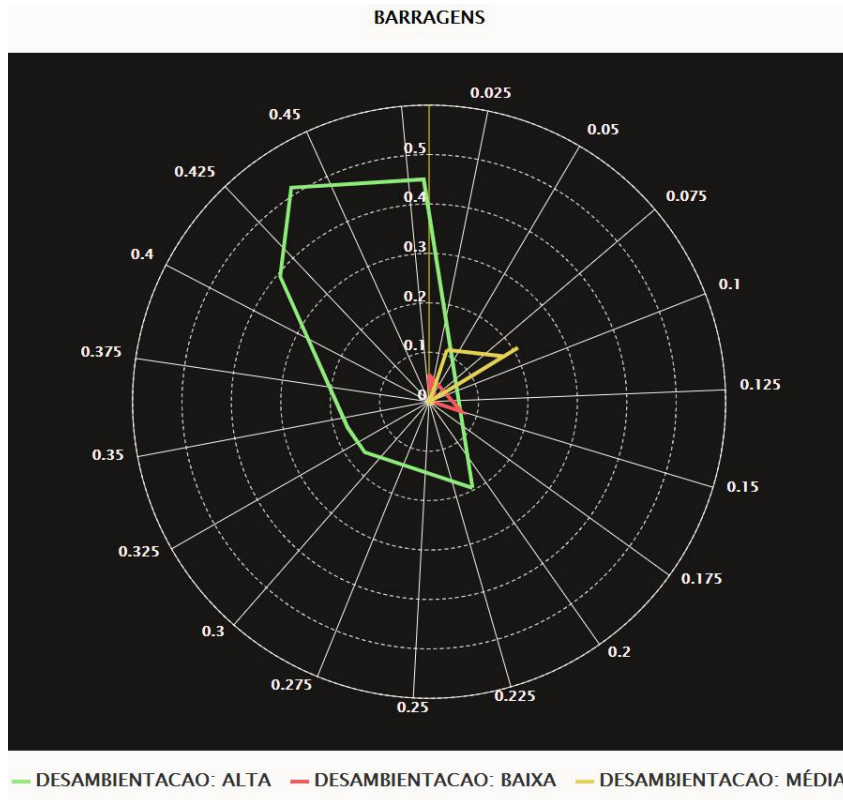
Figura 6: Árvore de Decisão que descreve o $IAH = f(d, b, a)$.



Fonte: Autores.

A Figura 7 apresenta a probabilidade para se definir o nível de desambientação, considerando o percentual de barragens como principal causa.

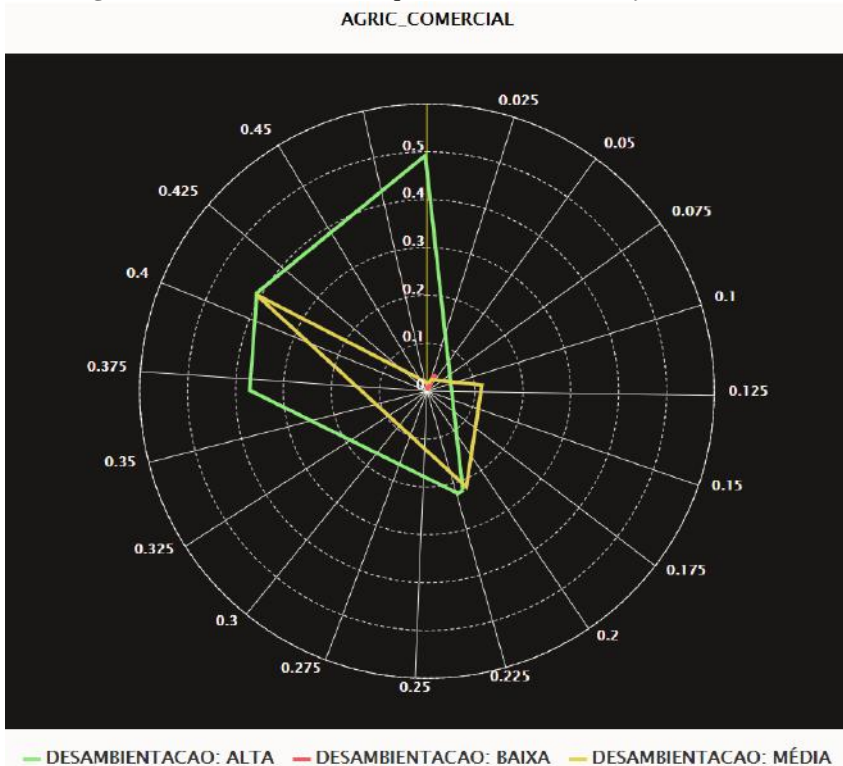
Figura 7: Árvore de Decisão que descreve o $IAH = f(d, b, a)$.



Fonte: Autores.

A Figura 8 representa a probabilidade para se definir o nível de desambientação, considerando o nível de área agrícola comercial como principal causa.

Figura 8: Árvore de Decisão que descreve o $IAH = f(d, b, a)$.



Fonte: Autores.

5. Considerações Finais

A estruturação de um panorama de ambientalização dos recursos hídricos e de governança da água na Amazônia é o produto da investigação geográfica que vem sendo executada acerca da gestão e gerenciamento dos recursos hídricos, em que contempla-se a composição de uma nova teoria científica na geografia das águas no Brasil, a partir da institucionalização de um moderno composto institucional que ajudará na conformação espacial ou geográfica do ordenamento jurídico-político dos recursos hídricos no território nacional.

Esse contemporâneo arranjo, de reconhecimento dos padrões da ambientalização dos recursos hídricos, foi implementado utilizando-se a estratégia de Inteligência Artificial. Inicialmente foi realizada uma Modelagem Matemática que identificou como as variáveis percentual de desmatamento, percentual de barragens e percentual de áreas destinadas à agricultura comercial, influenciam o índice de Ameaça Hídrica. Em seguida, foi possível desenvolver, mediante a aplicação da Computação Bioinspirada, uma Árvore de Decisão capaz de reconhecer e apresentar padrões entre as variáveis percentual de desmatamento, percentual de barragens e percentual de áreas destinadas à agricultura comercial e o índice de Ameaça Hídrica.

Os resultados apresentados indicam o comportamento de cada variável estudada, em forma de funções matemáticas, e identifica os padrões de segurança para cada variável e seu grau de influência no índice de Ameaça Hídrica. A partir desse produto foi possível estimar, com excelente precisão e altíssima acurácia, o nível seguro para que manejos florestais, construção de barragens e criação de áreas destinadas à agricultura comercial.

A estimativas, por exemplo, mostraram que Índice de Ameaça Hídrica (IAH) apresenta uma variação cúbica com o desmatamento; que o IAH varia exponencialmente com o percentual de barragens e de forma quadrática com o percentual de área agrícola comercial. Esses comportamentos não apresentavam definições em suas variações.

A partir dessas estimativas somadas ao modelo de Árvore de Decisão, a gestão pública poderá tomar decisões, com predições simuladas, muito semelhantes à realidade encontrada.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, onde a pesquisa foi orientada. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA Ananindeua, pelo apoio a qualificação docente. Ao grupo de pesquisa Gradiente de Modelagem Matemática e Simulação Computacional – GM²SC, pela fundamentação científica e tecnológica.

Referências

- Abreu, W. L. de. (2017). A abordagem ambiental na geografia: elementos para uma discussão sobre teoria e método. *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*, <<http://www.eumed.net/rev/cccss/2017/04/abordagem-ambiental-geografia.html>>.
- Azancort, Neto, J. L., Gonçalves, A. L. S., Cruz, B. C. C. da, Gomes, L. L., & Costa, D. C. L. (2021). Artificial Intelligence implemented to recognize patterns of sustainable areas by evaluating the database of socioenvironmental safety restrictions. *Research, Society and Development*, 10(10), e212101018841. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18841>.
- Calhman, O., & Da Hora, M. (2017) A Bacia Amazônica no Contexto da Gestão Compartilhada de Recursos Hídricos Transfronteiriços. *Journal of Water Resource and Protection*, 9, 629-636
- Costa, D. C. L., Nunes, M. V., Vieira, J. P., & Bezerra, U. H. (2016). Decision tree-based security dispatch application in integrated electric power and natural-gas networks. *Electric Power Systems Research*, 141, 442-449.
- Costa, D. C. L., Costa, H. A. de O., & Neves, L. P. (2019). Métodos Matemáticos Aplicados nas Engenharias via Sistemas Computacionais. 2nd ed. SINEPEM-IFPA.
- Costa, D. C. L., Costa, H. A. de O., Castro, A. P. S., Cruz, E. C., Azancort Neto, J. L., & Cruz, B. C. C. da. (2020). The dimensions of Mathematical and Computational Modeling prescribed to Environmental Management. *Research, Society and Development*, 9(10) <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9013>.
- Costa, D. C. L., Costa, H. A. de O., Silva, H. C. M. da, & Silva, S. T. T. da. (2021). Matemática Computacional Aplicada à Ciência e Tecnologia, Belém, PA, SINEPEM-IFPA.

- Costa, H. A. de O., Gomes, L. L., Costa, D. C. L., Rocha, E. M., Francês, C. R., & Andrade, S. H. (2021). Fractional order differential calculus applied on decision making system to smart grid management via decision trees. *Research, Society and Development*, 10(16), e38101623387. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.23387>.
- Fearnside, P. M., Val, A. L., Almeida, V. M. F de, Santos, G. M dos, Piedade, M. T. F, Junk, W, Nozawa, S. R, Silva, S. T da, & Dantas, F. A. de C. (2017). Amazonia: Water Resources and Sustainability. In: *Waters of Brazil*, p.73-88.
- Ferreira, F. N, Ribeiro, H. M. C., Beltrão, N. E. S, Pontes, A. N, & Lopes, S. R. M. (2017). Gestão de recursos hídricos na Amazônia: um panorama da participação da sociedade civil nos espaços deliberativos. *HOLOS*, 33(8), 366-351.
- Ferreira, R. de S. (2020). Valorisation and commodification of water. *Research, Society and Development*, 9(7), e682972403. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.2403>.
- Ghafoori-Kharanagh, S., Banihabib, M.E., Javadi, S, & Randhir, T. O. (2021). Participatory Water-Food-Energy Nexus Approach for Evaluation and Design of Groundwater Governance. *Water Resour Manage* 35, 3481–3495.
- Machado, F. F., Machado, F. F. F., Pontes, A. N. (2021). A Segurança Ambiental na Amazônia Brasileira à luz do conceito de Segurança internacional da Escola de Copenhague e a evolução sobre o estudo de Segurança Ambiental no Século XXI. Revista *Contribuciones a las Ciencias Sociales*. <https://www.eumed.net/rev/ccss/2019/09/seguranca-ambiental-amazonia.html>.
- Mello, k. de, taniwaki, R. H., paula, F. R. de, valente, R. A, Randhir, T. O, Macedo, D. R., Leal, C. G. Rodrigues, C. B., Hughes, R. M. (2020). Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 270,110879, 1-16.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. Núcleo de Tecnologia Educacional – UFSM. (2021). <https://rapidminer.com/>.
- Rocha, P. C., & Santos, A. A. dos. (2018). Análise Hidrológica em Bacias Hidrográficas. *Mercator*, 17, e17025.
- Santos, M. G., & Quintero, M. (2018). Saberes tradicionais e locais: reflexões etnobiológicas EDUERJ, 191 p.
- Silva, A. T. da. (2015). Amazônia na agenda ambiental global. NUMA/UFGA.
- Teisserenc, P. (2020). Ambientalização e Territorialização: situando o debate no contexto da Amazônia brasileira. *Antropolítica Niterói*, (29), 153-179.