

**VINICIUS RODRIGUES DOS SANTOS PETERSEN**

**ASPECTOS AMBIENTAIS DA MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*) -  
ADEQUABILIDADE EDAFOCLIMÁTICA E VALORAÇÃO DA FIXAÇÃO DE  
CARBONO NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro

Coorientadores: Sandro Lucio Silva Moreira  
Victor Hugo Benezoli

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P484a  
2023

Petersen, Vinicius Rodrigues dos Santos, 1995-  
Aspectos ambientais da macaúba (*Acrocomia aculeata*) -  
adequabilidade edafoclimática e valoração da fixação de carbono  
no Brasil / Vinicius Rodrigues dos Santos Petersen. – Viçosa,  
MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (68 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.266>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Climatologia agrícola. 2. Macaúba. 3. Sequestro de  
carbono. 4. Zoneamento. I. Imbuzeiro, Hewlley Maria Acioli,  
1980-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em  
Meteorologia Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 630.2516

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552


**VINICIUS RODRIGUES DOS SANTOS PETERSEN**

**ASPECTOS AMBIENTAIS DA MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*) -  
ADEQUABILIDADE EDAFOCLIMÁTICA E VALORAÇÃO DA FIXAÇÃO DE  
CARBONO NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 16 de fevereiro de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 VINICIUS RODRIGUES DOS SANTOS PETERSEN  
Data: 12/05/2023 10:33:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Vinicius Rodrigues dos Santos Petersen  
Autor

Documento assinado digitalmente  
 HEWLLEY MARIA ACIOLI IMBUZEIRO  
Data: 15/05/2023 10:19:24-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro  
Orientadora

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato aos meus pais por sempre me incentivarem e acreditarem que eu seria capaz de superar os obstáculos.

Agradeço à minha orientadora, Hewlley Imbuzeiro pela oportunidade de poder trabalhar em um projeto de grande oportunidade de aprendizado.

Agradeço aos meus amigos que sempre me ajudaram de alguma forma a desenvolver um trabalho melhor e ajudar em alguns direcionamentos desde o início deste projeto de pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Também quero agradecer à Universidade Federal de Viçosa e ao seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino.

## RESUMO

PETERSEN, Vinicius Rodrigues dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Aspectos ambientais da macaúba (*Acrocomia aculeata*) - adequabilidade edafoclimática e valoração da fixação de carbono no Brasil**. Orientadora: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Coorientadores: Sandro Lúcio Silva Moreira e Victor Hugo Benezoli.

O mundo deverá alcançar a meta de neutralização de carbono (NetZero) somente entre os anos de 2065 e 2070 e para que isso se torne realidade, diversas ações devem ser desenvolvidas no que se refere a diminuição do uso de combustíveis fósseis, mas também no desenvolvimento de projetos de sequestro e captura de carbono. A transformação das áreas de pastagem degradadas em zonas de cultivo se torna uma ferramenta relevante nesse processo devido a grande quantidade de áreas que hoje não exercem mais o seu papel ecossistêmico e que por muitas vezes até possuem um valor líquido negativo na captura de carbono, ou seja, liberam mais carbono para a atmosfera do que capturam. A macaúba (*Acrocomia aculeata*) surge como uma espécie vegetal promissora para o mercado internacional de carbono, podendo contribuir com a fixação de cerca de 28,73 t CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> anuais em plantas de 1,6 a 9 anos além de oferecer potencial para suprir demandas alimentares e energéticas, se apresentando então como uma espécie favorável para o plantio nessas áreas degradadas. Além disso, mostra-se cada vez mais relevante o estudo de áreas mais adequadas para determinados tipos de plantio, buscando-se uma segurança maior do investimento aplicado. O primeiro capítulo deste trabalho teve como objetivo realizar um zoneamento edafoclimático do território brasileiro de áreas com maior chance de sobrevivência da macaúba para fundamentar a tomada de decisão de investimento do cultivo da espécie. O segundo capítulo teve como objetivo estimar os ganhos econômicos referentes à captura e estoque de carbono, como serviço ecossistêmico, ao se substituir uma cultura de pastagem degradada pelo cultivo da macaúba. Os resultados obtidos mostraram que a macaúba possui uma maior ocorrência de forma natural na região do Cerrado, mas com possibilidade de ser encontrada em diferentes tipos de regiões devido a sua alta adaptabilidade. Dentro dessas áreas propícias para o cultivo da macaúba, mais de 74 milhões de hectares são classificados como áreas de alta adaptabilidade, e se, ao considerarmos o intervalo de adaptabilidade média e alta juntas, esse valor atinge mais de 232 milhões de hectares. Outro importante resultado mostra que mais de 30 milhões de hectares de pastagem degradadas estão aptos ao desenvolvimento da macaúba, o modelo InVEST, utilizado neste trabalho ainda indicou que há uma possibilidade de ganhos de €13.095 por hectare. Os resultados sugerem que

a proposta do projeto em substituir as áreas degradadas pelo cultivo da macaúba representa uma estratégia de destaque com diversos impactos positivos tanto na cadeia produtiva, produção de alimentos, alternativa econômica, mas também como um aliado no combate à emissão de gases do efeito estufa.

**Palavras-chave:** Macaúba. Valoração de carbono. Zoneamento ambiental.

## ABSTRACT

PETERSEN, Vinicius Rodrigues dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2023. **Environmental aspects of macaúba (*Acrocomia aculeata*) - edaphoclimatic suitability and valuation of carbon fixation in Brazil.** Adviser: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Co-advisers: Sandro Lúcio Silva Moreira and Victor Hugo Benezoli

The world must only reach the carbon neutrality target (NetZero) between the years 2065 and 2070 and for this to become a reality, several actions must be developed aiming the reducing of the use of fossil fuels, but also in the development of carbon sequestration and capture projects. The transformation of degraded pasture areas into cultivation zones becomes an important tool in this process due to the large quantity of areas that today no longer play their ecosystem role and that often even have a negative net value in carbon capture, in other words, they release more carbon into the atmosphere than they capture. Macaúba palm (*Acrocomia aculeata*) emerges as a promising species for the international carbon market, contributing to the sequestration of approximately 28.73 t CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> per year in plants from 1.6 to 9 years old, in addition offering the potential to meet food and energy demands, thus presenting itself as a propitious species for cultivation in these degraded areas. Furthermore, the study of more suitable areas for certain species is becoming more relevant, seeking more security for the investment applied. The first chapter of this work aimed to carry out an edaphoclimatic zoning of the Brazilian territory of areas with the greatest chance of survival for macaúba cultivation, in order to support decision-making to substantiate investment in the cultivation of this species. The second chapter aimed to estimate the economic gains related to carbon capture and storage, as an ecosystem service, when replacing a degraded pasture crop with macaúba cultivation. The obtained results showed that macaúba has a higher occurrence naturally in the Cerrado region, however it has the possibility of being found in different types of regions due to its high adaptability. Within these propitious áreas to the cultivation of macaúba, more than 74 million hectares are classified as areas of high adaptability, and if, when we consider the range of medium and high adaptability together, this value reaches more than 232 million hectares. Another important result shows that more than 30 million hectares of degraded pasture are suitable for the development of macaúba, the InVEST model, used in this work, also indicated that there is a possibility of gains of €13,095 per hectare. The results suggest that the project's proposal to replace degraded areas by macaúba cultivation represents a prominent strategy with

several positive impacts both in the production chain, food production, but also as an ally in the fight against greenhouse gas emissions.

**Keywords:** Carbon valuation. Environmental zoning. Macaúba

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Classificação climática do Brasil segundo o critério de Koppen (1936). .....	21
Figura 2. Representação gráfica da distribuição das principais variáveis estudadas no território brasileiro. ....	24
Figura 3. Representação de uma árvore de decisão. ....	27
Figura 4. Dados de ocorrência natural da macaúba no Brasil. ....	31
Figura 5. Mapa de distribuição da macaúba para cada tipo de solo. ....	33
Figura 6. Mapa de adaptabilidade da macaúba segundo o método de Cluster. ....	34
Figura 7. Mapa de adaptabilidade da macaúba segundo o método Logitreg. ....	35
Figura 8. Mapa de adaptabilidade da macaúba segundo o método MaxEnt. ....	36
Figura 9. Mapa de adaptabilidade da macaúba segundo o modelo Random Forest. ....	37
Figura 10. Mapa final de adaptabilidade da macaúba. ....	38
Figura 11. Biomas do Brasil. ....	39
Figura 12. Regiões de média e alta adaptabilidade da macaúba dentro da área de estudo. ....	41
Figura 13. Mapa de áreas de pastagem degradadas no Brasil. ....	54
Figura 14. Fluxograma representando a estrutura hierárquica do modelo InVEST de sequestro e estoque de carbono. ....	53
Figura 15. Mapa de intersecção da adaptabilidade da macaúba e pastagem degradada. ....	59

## SUMÁRIO

<b>I. INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>11</b>
<b>II. REFERÊNCIAS</b>	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO 1 - Exigências edafoclimáticas e adaptabilidade da macaúba (Acrocomia aculeata) no Brasil</b>	<b>16</b>
<b>CHAPTER 1 - Edaphoclimatic requirements and adaptability of macaúba palm (Acrocomia aculeata) in Brazil</b>	<b>17</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2. OBJETIVO</b>	<b>20</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Descrição da área de estudo</b>	<b>20</b>
<b>3.2. Caracterização da espécie</b>	<b>22</b>
<b>3.3. Ocorrência da espécie</b>	<b>23</b>
<b>3.4. Base de Dados</b>	<b>23</b>
<b>3.4.1. Dados do Clima</b>	<b>23</b>
<b>3.4.2. Dados de Solo</b>	<b>24</b>
<b>3.5. Zoneamento Edafoclimático</b>	<b>25</b>
<b>3.5.1. Aplicação dos modelos para o zoneamento</b>	<b>26</b>
<b>3.5.1.1. Random Forest</b>	<b>26</b>
<b>3.5.1.2. Logitreg</b>	<b>28</b>
<b>3.5.1.3. MaxEnt</b>	<b>28</b>
<b>3.5.1.4. Análise de cluster</b>	<b>29</b>
<b>3.6. Resultado final do zoneamento</b>	<b>30</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>31</b>
<b>4.1. Distribuição geográfica da macaúba</b>	<b>31</b>
<b>4.3. Modelos de zoneamento</b>	<b>34</b>
<b>4.4. Áreas de melhor adaptabilidade</b>	<b>40</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>42</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO 2 – Modelagem da quantidade e valoração do sequestro de carbono do cultivo de macaúba (Acrocomia aculeata) em áreas de pastagem degradada no Brasil</b>	<b>47</b>
<b>CHAPTER 2 – Modeling the amount and valuating the carbon sequestration from macaúba cultivation (Acrocomia aculeata) in degraded pasture areas in Brazil</b>	<b>48</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>49</b>
<b>2. OBJETIVO</b>	<b>51</b>

<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>51</b>
3.1. Modelo de Valoração InVEST	51
3.2. Base de dados	53
3.2.1. Uso e cobertura do solo	53
3.2.3. Dados econômicos para valoração	56
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>58</b>
4.1. Intersecção dos mapas	58
4.2. Modelo InVEST	60
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>62</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>63</b>
<b>III. CONCLUSÕES GERAIS</b>	<b>67</b>

## I. INTRODUÇÃO GERAL

O questionamento que norteia grande parte das pesquisas científicas e a tomada de decisões dos agentes públicos e privados está baseado na seguinte problemática: como atender à crescente demanda mundial por alimentos, energia e matéria-prima sem comprometer os componentes bióticos e abióticos do sistema terrestre? A interação entre o meio ambiente e a economia torna o desafio mais complexo, pois uma economia saudável depende de ecossistemas saudáveis. Entre a crescente pressão pelo desenvolvimento econômico e o aumento na demanda por recursos naturais, a economia verde se torna um modelo econômico complexo e provocador, porém necessário e urgente (MIKHNO et al., 2021).

As atividades antropogênicas são as principais causadoras do aumento da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) e nos últimos 150 anos elevou o nível da concentração média de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera de 280 ppmv, no período pré-industrial, para o marco histórico superior a 400 ppmv em 2016 (IPCC, 2021). Com isso fica evidente que o ciclo global do CO<sub>2</sub> entrou em desequilíbrio e trouxe à tona o problema de emissões humanas de gases de efeito estufa, sobretudo o gás carbônico (CORNELIS VAN KOOTEN, et al., 2021). O excesso de emissões de GEEs para a atmosfera provoca não apenas o aumento da temperatura média do planeta, mas também o aumento da frequência de eventos extremos de clima, provocando o desequilíbrio do sistema climático e impactando todos os seres vivos (IPCC, 2022).

Algumas estratégias de adaptação podem reduzir a vulnerabilidade dos sistemas natural e humano a fatores externos, porém o aumento da temperatura média planetária e o aumento na frequência de eventos extremos climáticos têm levado a alguns impactos irreversíveis, à medida que esses sistemas são levados além da sua capacidade de adaptação (IPCC, 2022). A ação acelerada e equitativa na mitigação e adaptação aos impactos das mudanças climáticas é fundamental para o desenvolvimento sustentável, em especial a participação dos setores de energia, agricultura, florestal, construção, transporte e indústria, que possui forte potencial para reduzir as emissões líquidas de GEEs (IPCC, 2022), caso atuem de forma sustentável.

O objetivo central do Acordo de Paris reforçou o compromisso internacional entre mais de cento e noventa países e a União Europeia de limitar o aquecimento global em 1,5°C até 2100 em comparação com os níveis do período pré-industrial (UNDP & IPCC, 2019). Porém, o valor de apenas 6% na redução das emissões de CO<sub>2</sub>, decorrentes do confinamento global durante a pandemia da COVID-19 nos anos 2020 e 2021 reforçam o desafio, pois a redução foi menor do que o valor anual de 8% previsto para atingir a meta do Acordo de Paris (LIU et al., 2022).

Durante a Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP26), coordenada pela Organização das Nações Unidas (ONU) e sediada em Glasgow em 2021, as cláusulas do Acordo de Paris foram retificadas e regulamentadas, com destaque para a criação de instrumentos de mercado de carbono com abrangência global. Dentre estes instrumentos, o Mecanismo de Ajustamento Carbônico Fronteiriço (MACF) da União Europeia representa oportunidade de negócio para alguns países, pois visa taxar produtos importados quando oriundos de países que não possuem um sistema de precificação de carbono regulado (RIDELENSKY & SANTOS, 2022). Outra oportunidade é que os países poderão comercializar créditos de carbono entre si, sendo esse um passo fundamental para permitir a transição para a economia de baixo carbono e auxiliar no combate ao aquecimento global (CAETANO & FILIPPE, 2021).

O mundo deverá alcançar a meta de neutralização de carbono (NetZero) entre os anos de 2065 e 2070 e a precificação do carbono é uma estratégia promissora para esse fim (ZHAO et al., 2021). Parte dos economistas assume que as taxas e o sistema de comércio de carbono são as estratégias mais baratas para diminuir as emissões de gases de efeito estufa (OECD, 2013).

O Brasil possui posição de destaque para o mercado de carbono devido a sua meta ambiciosa e realista de redução de emissões de GEEs e como alternativa compensatória de carbono negativo. As Contribuições Nacionalmente Determinadas Pretendidas (sigla em inglês, INDCs) brasileiras representam a redução das emissões de gases do efeito estufa abaixo dos níveis do ano de 2005, em percentuais de 37% até o ano de 2025 e 43% até o ano de 2030. Para alcançar estas metas e atingir um cenário NetZero, o Brasil terá que mobilizar todos os setores de maneira distinta para a mitigação da emissão de GEEs (GARCIA et al., 2022).

O setor agropecuária, florestal e outros usos do solo (AFOLU) possui um papel relevante em termos de compensação para os demais setores que não conseguirem zerar as emissões de efeito estufa. Dentre as opções de compensação do AFOLU está a alocação de carbono pela vegetação (ARRATIA et al., 2020), que pode ser via reflorestamento, recuperação das pastagens degradadas e implementação de sistemas integrados (ILP) e agroflorestais (ILPFs – interação lavoura-pecuária-floresta comercial e ILPFn - integração lavoura-pecuária-floresta nativa) (GARCIA et al., 2022).

Neste contexto, a macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) surge como uma espécie vegetal promissora para o mercado internacional de carbono, podendo contribuir com a fixação de cerca de 28,73 t CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> anuais em plantas de 1,6 a 9 anos (MOREIRA et al., 2020a). Além desta contribuição no âmbito da fixação de carbono, a macaúba possui

características de tolerância ao fogo e a períodos prolongados de seca, alta plasticidade em relação às condições ambientais (clima e solo) (BORGES et al., 2021) e ocorrência de populações naturais em áreas degradadas (REPORT et al., 2015). Todos estes aspectos norteiam a macaúba como uma espécie sustentável (POETSCH et al., 2012).

Outro aspecto relevante é a característica econômica desta espécie, pois praticamente todas as partes da planta tem aplicações comerciais para diversos tipos de mercado. O fruto produz óleo vegetal de qualidade e pode ser utilizado para síntese de biocombustíveis e como matéria-prima nas indústrias de cosméticos e alimentícia (BARBOSA-EVARISTO et al., 2018; FURUMO & AIDE, 2017a). As tortas da polpa e da amêndoa podem ser utilizadas como aditivo alimentar para animais e humano “*plant-based food*”, e o endocarpo como carvão ativado (BOAS et al., 2009; NOVAES, 1952). Todas estas características alinhadas às políticas públicas de incentivo nacional de biocombustíveis (UBRABRIO, 2021), a Política de Garantia de Preços Mínimos (PGPM), a lei de incentivo ao plantio da Macaúba (Lei nº 19.485/2011 no Estado de Minas Gerais) e o projeto da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do estado de São Paulo (SIMA) estão impulsionando o desenvolvimento da cadeia produtiva desta espécie no Brasil. O foco desta cadeia é na sustentabilidade, fato que norteia a implementação da Macaúba em áreas degradadas.

Neste sentido, o objetivo geral deste estudo foi avaliar as áreas de ocorrência natural da macaúba no Brasil em consideração as exigências edafoclimáticas (clima e solo) da espécie utilizando o método de zoneamento edafoclimático (VENKATESWARLU & RAO, 2013; VOGEL et al., 2019). Em uma segunda etapa, foi valorado o serviço ecossistêmico de captura de CO<sub>2</sub> atmosférico potencial da macaúba, em um cenário onde ocorreria a implementação do plantio dessa espécie em áreas de pastagem degradada, utilizando o modelo de valoração ambiental InVEST (CHU et al., 2019).

## II. REFERÊNCIAS

ARRATIA, A. L. D. et al. Structure and biomass analysis of urban vegetation in squares of Santa Cecília District, São Paulo, SP. **Revista Arvore**, v. 44, p. 1–12, 2020.

BARBOSA-EVARISTO, A. et al. Simulation of macauba palm cultivation: an energy-balance and greenhouse gas emissions analysis. **Carbon Management**, v. 9, n. 3, p. 243–254, 2018.

BOAS et al. Aproveitamento de resíduos de Macaúba para produção de carvão vegetal, in: Lavras: **5º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras Biodiesel**, 2009.

BORGES et al. Distribution and future projection of potential cultivation areas for *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) worldwide: the emerging energy culture of the tropics. **Theor Appl Climatol** 146, 1069–1078 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03788-6>

CAETANO, R.; FILIPPE, M. **Mercado de carbono criado: COP26 tem documento final**. Disponível em: <<https://exame.com/negocios/mercado-de-carbono-criado-cop26-tem-documento-final/>>. Acesso em: 4 maio. 2022.

CHU, X. et al. Assessment on forest carbon sequestration in the Three-North Shelterbelt Program region, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 382–389, 2019.

FURUMO, P. R.; AIDE, T. M. Characterizing commercial oil palm expansion in Latin America: Land use change and trade. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, 2017.

GARCIA, M. et al. **Como viabilizar um Brasil neutro em gases de efeito estufa até 2050?** [s.l: s.n.].

GOVERNMENT OF THE FEDERATIVA REPUBLIC OF BRAZIL. Intended Nationally Determined Contribution: Towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change. **Intended Nationally Determined Contribution, 9, 6**. (2015). [http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published\\_Documents/Brazil/1/BRAZIL\\_inDC\\_english\\_FINAL.pdf](http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published_Documents/Brazil/1/BRAZIL_inDC_english_FINAL.pdf).

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the **Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the **Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001.

LIU, Z. et al. Monitoring global carbon emissions in 2021. **Nature Reviews | Earth & Environment**, v. 3, p. 217–219, 2022.

MIKHNO, I. et al. Green Economy in Sustainable Development and Improvement of Resource Efficiency. **Central European Business Review**, n. 1, p. 15, 2021.

MINAS GERAIS. **Lei Ordinária Nº 19.485/2011. 13 de janeiro de 2011**. Data de acesso: 05/10/2022. Disponível em: < <https://leisestaduais.com.br/mg/lei-ordinaria-n-19485-2011-minas-gerais-institui-a-politica-estadual-de-incentivo-ao-cultivo-a-extracao-a-comercializacao-ao-consumo-e-a-transformacao-da-macauba-e-das-demais-palmeiras-oleaginosas-pro-macauba> >.

MOREIRA, S. L. S. et al. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020a.

MOREIRA, S. L. S. et al. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020b.

NOVAES, R. F. Contribuição para o estudo do coco "macauba". 1952. **Tese (Doutorado)** – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1952. Acesso em: 23 out. 2022.

OECD. **Effective carbon prices**. [s.l: s.n.]. v. 9789264196. 2005.

POETSCH, J. et al. Acrocomia aculeata – a sustainable oil crop. **Rural** 21, p. 41–44, 2012.

REPORT, M. et al. **World ' s Soil Resources**. [s.l: s.n.]. 2015.

RIDELENSKY, J. DO C. F.; SANTOS, A. R. Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL uma coletânea de projetos aprovados no Brasil na última década. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, p. e38711427087, 2022.

UBRABIO. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel**. Disponível em: <<https://ubrablo.com.br/pnpb/>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

UNITED NATIONS. **Adoção do Acordo de Paris.2015**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf>>. Acesso em: set. 2022.

UNITED NATIONS - Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). **The Paris Agreement**. 2016. <[http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php)>. Acesso em: set. 2022.

UNDP & IPCC. *The Heat Is on: Taking Stock of Global Climate Ambition*. (2019).

VENKATESWARLU, B.; RAO, V. U. M. Climate change and its impact on Indian agriculture. **Climate Change Modeling, Mitigation, and Adaptation**, p. 419–453, 2013.

VOGEL, E. et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 5, 2019.

ZHAO, L. T. et al. A multi-factor integrated model for carbon price forecasting: Market interaction promoting carbon emission reduction. **Science of the Total Environment**, v. 796, p. 149110, 2021.

## **CAPÍTULO 1 - Exigências edafoclimáticas e adaptabilidade da macaúba (*Acrocomia aculeata*) no Brasil**

**Resumo** - O Brasil possui uma posição de destaque no que se refere a seu grande potencial para a produção de alimentos e de combustíveis. O setor do agronegócio possui forte relevância na economia brasileira com a participação de 27,4% no PIB em 2021. Neste contexto, a macaúba destaca-se como uma espécie vegetal potencial na cadeia de suprimentos, devido ao crescente interesse pelo cultivo comercial dessa espécie uma vez que é uma palmeira nativa das regiões tropicais do continente americano e cujo fruto é matéria prima para a produção de óleos e outros fins. Esta espécie pode produzir 6.000 litros de óleo por hectare, um dado relevante no que diz respeito às metas assumidas pelo Brasil nos compromissos internacionais no que tange às medidas de combate às mudanças climáticas por também ser uma planta que captura uma quantidade expressiva de carbono. Identificar as condições de clima e solo que influenciam na distribuição espacial e na sobrevivência da macaúba nas diferentes regiões do Brasil é fundamental para que se tenha uma cadeia produtiva sólida e sustentável a longo prazo. No presente capítulo foi realizado um estudo da distribuição espacial da espécie macaúba levando em conta algumas variáveis edafoclimáticas para indicar as regiões mais favoráveis à ocorrência da macaúba e a sua sobrevivência dentro do território brasileiro. Para caracterizar o clima atual das regiões de estudo, utilizou-se os dados de precipitação anual, temperatura média do ar anual, temperatura mínima média do mês mais frio, temperatura máxima média do mês mais quente, radiação solar anual, umidade relativa do ar média anual e a evapotranspiração de referência média anual. Para as variáveis de solo, foram utilizados os dados de classes de solo do Brasil, gradiente textural e valores de capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Para se chegar ao dado final de adaptabilidade foram utilizados 4 tipos de métodos de zoneamento diferentes, e que teve como o resultado de maior destaque, uma maior adaptabilidade da macaúba para a região do Cerrado. Obteve-se também como resultado que mais de 74 milhões de hectares são classificados como áreas de alta adaptabilidade para a macaúba, enquanto ao considerarmos o intervalo de adaptabilidade média e alta juntas, foi encontrado um valor de mais de 232 milhões de hectares com potencial de sobrevivência da espécie, destacando o quanto a cultura da macaúba pode ser mais explorada no território brasileiro, seja para produção de biocombustível seja para produtos alimentícios.

Palavras-chave: Zoneamento ambiental. Macaúba. Adaptabilidade.

## CHAPTER 1 - Edaphoclimatic requirements and adaptability of macaúba palm (*Acrocomia aculeata*) in Brazil

**Abstract** - Brazil has a prominent position due to its great potential for food and fuel production. The agribusiness sector has a strong relevance in the Brazilian economy with a 27.4% share of GDP in 2021. In this context, macaúba stands out as a potential plant species in the supply chain, due to the growing interest in the commercial cultivation of this species since it is a palm native to the tropical regions of the American continent and whose fruit is raw material for the production of oils and other purposes. This species can produce 6,000 liters of oil per hectare, relevant data regarding the goals assumed by Brazil in international commitments when talking about measures to combat climate change, also being a plant that captures a significant amount of carbon. Identifying the climate and soil conditions that influence the spatial distribution and survival of macaúba in the different regions of Brazil is essential for a solid and long-term sustainable production chain. taking into account some edaphoclimatic variables, to delimit the intervals of occurrence of the species and the most favorable regions for the occurrence of macaúba within the Brazilian territory. To characterize the current climate conditions of the studied regions, data of annual precipitation, annual average air temperature, average minimum temperature of the coldest month, average maximum temperature of the hottest month, annual solar radiation, average relative humidity of the air and annual mean reference evapotranspiration were used. Data from soil classes in Brazil and values of field capacity and permanent wilting point were also used. to construct the final adaptability map. 4 different types of zoning models were used, which had as the more impactful result, a greater adaptability of macaúba to the Cerrado region. As a result, more than 74 million hectares were classified as areas of high adaptability for macaúba, while when considering the range of medium and high adaptability together, a value of more than 232 million hectares was found, highlighting how much the culture of macaúba can be further explored in the Brazilian territory, whether for the production of biofuel or for food production,

**Keywords:** Environmental zoning. Macaúba. Adaptability.

## 1. INTRODUÇÃO

Produzir alimentos suficientes para suprir a necessidade calórica de toda a população mundial na busca de uma vida ativa e saudável sempre foi um dos grandes desafios da humanidade (JOHNS HOPKINS BOOMBERG SCHOOL OF PUBLIC HEALTH, 2021). Em alguns momentos da história da sociedade o gargalo principal para vencer esse desafio era a baixa produção de alimentos. Nas últimas décadas, o setor da agricultura vem realizando vários avanços e esforços que garantiram que a quantidade de alimentos seja suficiente para atender a demanda da população global (HOLT-GIMÉNEZ et al., 2012). No entanto, o aumento da produção de alimentos pode não estar diretamente ligado com um aumento de oferta para todos.

O número de pessoas que enfrentam a fome ou a desnutrição aumentou em todo o mundo desde o começo da pandemia da Covid-19 (ONU, 2022). As estimativas indicam que cerca de 828 milhões de pessoas foram afetadas pela fome em 2021, um aumento de 150 milhões em relação ao início de 2020 (FAO, 2022). Esse aumento é impulsionado, em grande parte, por conflitos violentos, eventos climáticos extremos e pela pandemia de COVID-19, que impactam nas questões socioeconômicas, como a falta de renda e a inflação nos preços dos alimentos ao consumidor, e nos aspectos agronômicos, com a interrupção da cadeia de suprimento (grãos, fertilizantes e energia) e a redução da produtividade agrícola nas regiões susceptíveis a estes eventos (MCDONALD, 2010; SANTERAMO & LAMONACA, 2021, FAO, 2022)

Erradicar a fome no mundo e possibilitar o acesso à energia limpa são duas das dezessete metas para o desenvolvimento sustentável (MDSs) (UNITED NATIONS, 2019). Neste contexto, o Brasil possui uma posição favorável devido ao seu forte potencial para a produção de alimentos, que pode atender a demanda de cerca de 800 milhões de pessoas em todo o mundo (EMBRAPA, 2021) e de fornecer diferentes formas de biocombustíveis. O setor do agronegócio possui forte relevância na economia brasileira com a participação de 27,4% no PIB em 2021 e com recordes sucessivos de produção no biênio de 2020 e 2021(CEPEA, 2021). Ademais, o Brasil poderá se tornar líder mundial no fornecimento de alimentos, fibra e energia com a intensificação e sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas e florestais (EMBRAPA, 2018), o que inclui a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEEs) e a recuperação de áreas degradadas para mitigar o desmatamento na Amazônia e no Cerrado.

Neste contexto, a macaúba (*Acrocomia aculeata*) destaca-se como uma espécie vegetal com forte viés de sustentabilidade no âmbito da estocagem de carbono e para a recuperação de áreas degradadas (MOREIRA et al., 2020b; POETSCH et al., 2012). Uma área cultivada com

macaúbas de 9 anos de idade no espaçamento 5 x 5 (400 plantas ha<sup>-1</sup>) pode estocar 61,6 toneladas de carbono na biomassa abaixo e acima do solo, ou seja, 226,17 Mg Ceq.ha<sup>-1</sup> (MOREIRA et al., 2020) enquanto uma área do bioma Cerrado estoca cerca de 34,6 toneladas de carbono abaixo e acima do solo (PAIVA, 2011). Se implementada em área degradada, a macaúba pode imobilizar carbono e incrementar o solo com matéria orgânica durante o seu tempo de vida, estimado entre 60 e 70 anos (POETSCH et al., 2012) ou durante o seu período de produção que pode chegar a mais de 30 anos (MOREIRA et al., 2020).

Na conjuntura atual, as espécies que suprem grande parte do mercado mundial de óleo vegetal são o óleo de palma (*Elaeis guineenses*) e o óleo de soja (*Glycine max*). Em 2021, o mercado global de óleo de palma obteve retornos avaliados em USD 92,84 bilhões, com a previsão da taxa de crescimento anual composto (CAGR, *Compound Annual Growth Rate*) em termos de receita de 5,64 % para o período 2022 e 2027 (MORDOR INTELLIGENCE, 2021). Corroborando com a previsão de crescimento, o mercado de óleo de soja pode atingir USD 3,17 bilhões até 2025, com CAGR de 5,8% durante o período 2020 a 2025 (IDUSTRYARC, 2020). As características que impulsionaram a liderança destas espécies no mercado mundial são a versatilidade e o preço do óleo. Porém, estudos indicam que o cultivo em grande escala destas espécies promove fortes impactos ambientais e de segurança alimentar (ZION MARKET RESEARCH, 2016), fato que vem pressionando as indústrias a buscarem alternativas de matérias-primas mais sustentáveis.

A macaúba é a espécie de menor risco técnico e econômico entre as candidatas a fornecer matéria prima à produção de biodiesel e bioquerosene (EPE, 2020). Esta espécie pode produzir 6.000 litros de óleo por hectare, um dado relevante para atender às metas assumidas pelo Brasil e pelas empresas de aviação nos compromissos internacionais no que tange às medidas de combate às mudanças climáticas (NOBRE & WWF-BRASIL, 2022) impulsionada pela Lei nº 13.576/2017, instituindo a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio).

Estima-se que em 2030 a demanda por biodiesel salte de 6,8 milhões de litros (2020) para 11,5 milhões, valor calculado pelo Plano Decenal de Expansão de Energia para atender o Programa Nacional de Biocombustíveis. Para suprir esta demanda, seria necessário o cultivo de 11 milhões de hectares de soja, dez vezes a área atual, estimada em 1,6 milhão de hectares segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Esta mesma necessidade poderia ser atendida com uma área de 2 milhões de hectares, caso estivéssemos falando do cultivo da macaúba, uma diminuição de área de 81,8% (EPE, 2020). Outro fato relevante é que praticamente todas as partes da macaúba podem ser comercializadas (SOUZA et al., 2018).

Com óleo de alta qualidade, farelos, polpas e endocarpo a macaúba oferece produtos promissores para as indústrias de produção de alimentos, rações, biocombustíveis, cosméticos e farmacêuticas, fato que propicia ao agricultor uma diversidade de produtos para comercialização (PLATH,2016), o que garante maior versatilidade e segurança para lidar com a oferta e demanda dos mercados internos e externos. Apenas um hectare do cultivo dessa espécie ainda poderia prover 1.200 kg de carvão vegetal, e 5.300 kg de farelo para ração (MARISOLA FILHO, 2009).

Nesse contexto, identificar as condições de clima e solo que influenciam na distribuição espacial e na sobrevivência da macaúba nas diferentes regiões do Brasil é fundamental para que se tenha uma cadeia produtiva sólida e sustentável a longo prazo. A partir dessas informações, produtores rurais e empresas do agronegócio interessados no cultivo da macaúba podem investir com maior segurança, reduzindo perdas de produtividade causadas por fatores ambientais e optando por áreas com maior probabilidade de sucesso na produção. No presente capítulo foi realizado um estudo da distribuição espacial da espécie macaúba levando em conta algumas variáveis edafoclimáticas, para delimitar os intervalos de ocorrência da espécie e as regiões mais favoráveis à sobrevivência da macaúba dentro do território brasileiro.

## **2. OBJETIVO DO ESTUDO**

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo da distribuição espacial da macaúba (*Acrocomia aculeata*) para levantar os intervalos edafoclimáticos de ocorrência da espécie, e assim delimitar as regiões mais favoráveis à ocorrência/sobrevivência da macaúba dentro do território brasileiro.

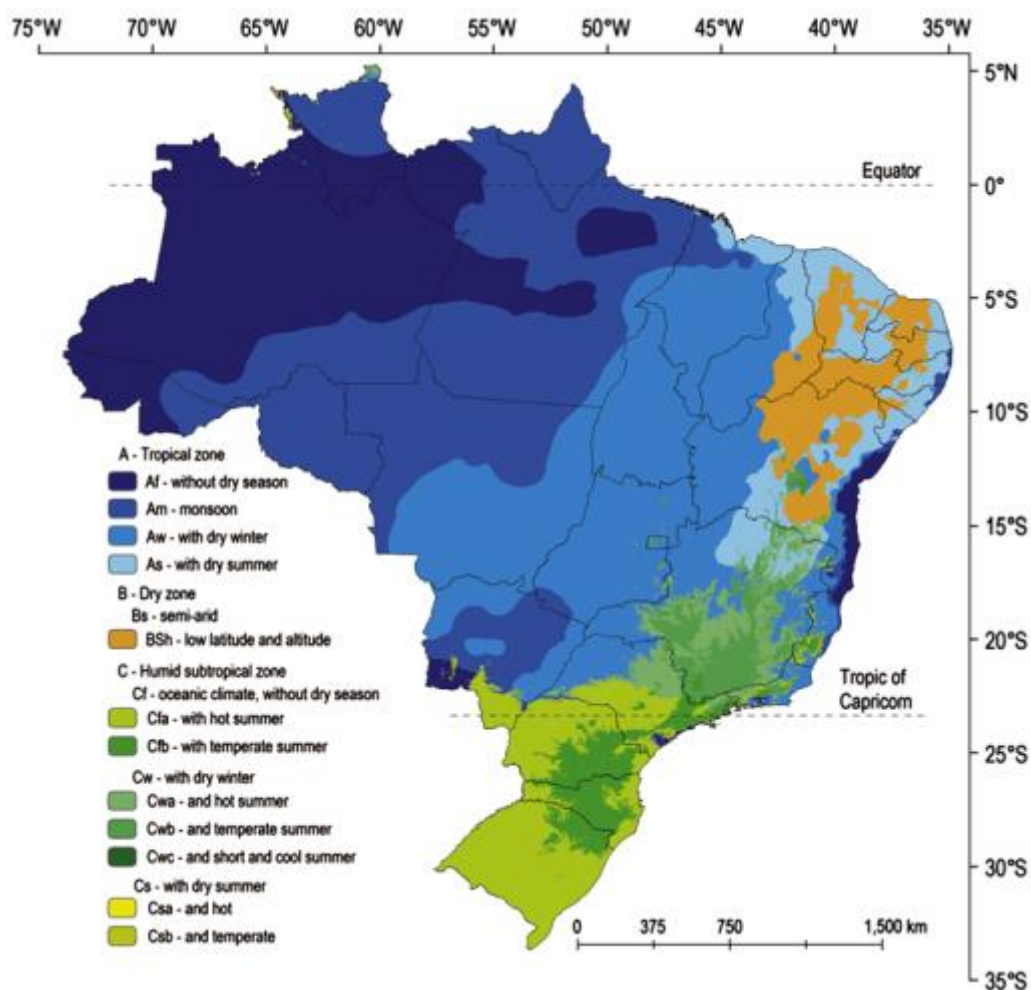
## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1. Descrição da área de estudo**

A área de estudo do presente trabalho abrangeu todo o território brasileiro que possui área de 8.510.345,540 km<sup>2</sup> (IBGE, 2022). Delimitado pelas latitudes de 5°16'20" N e 33°45'03" S e pelas longitudes de 34°47'30" O e 73°59'32" O. O Brasil é um país que integra a América do Sul e é o quinto maior país do planeta. Sua altitude varia desde o nível do mar até seu ponto mais alto, o pico da neblina, no estado do Amazonas, com 2.995,3 metros de altitude (ROSS, 2005).

A maior parte do Brasil se encontra no hemisfério sul (93%) e uma pequena parte (7%) é localizada no hemisfério norte e, portanto, com oposição das estações sazonais de verão (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF, no hemisfério sul) e inverno (junho, julho e agosto – JJA, no hemisfério sul). Devido a sua extensa faixa territorial, o país possui uma elevada variedade climática. A pluviosidade anual varia na faixa de 387 até 4000 mm, com certa sazonalidade pluviométrica: verões chuvosos e invernos secos (KOPPEN, 1936). Ainda a partir da classificação de Köppen e uma análise feita por Dubreuil et al. (2018), os climas do tipo "A" (tropicais) representam 81,4% do território, do tipo "B" (semi-áridos), 4,9% e 13,7% para aqueles do tipo "C" (temperados) representados na Figura 1. Há também uma extensa variação da temperatura no território brasileiro, com um fator de grande peso sendo a latitude e a altitude (ALVARES et al., 2013).

Figura 1. Classificação climática do Brasil segundo o critério de Köppen (1936).



Fonte: Álvares (2013).

Essa grande variabilidade climática, além de outros fatores favorece também a formação de uma rica biodiversidade e com elevados números de espécies endêmicas. De acordo com o IBGE (2019), o Brasil possui uma grande variedade de tipos de vegetação, distribuídos em 6 biomas: o Amazônico, cobrindo 49,5% do território; o Cerrado, com 23,3%; a Mata Atlântica, cobrindo 13%; a Caatinga, representando 10,1% do território nacional; os Pampas, com 2,3%; e o Pantanal, cobrindo 1,8% do território.

O Brasil possui uma grande diversidade de solos decorrente da ampla diversidade de ambientes e de fatores formadores de solo. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018) predominam os Latossolos, Argissolos e Neossolos, que do total somam aproximadamente 70% da cobertura do país.

### **3.2. Caracterização da espécie**

Classificada como uma espécie de palmeira nativa da América do Sul, a macaúba ocorre na região tropical do continente americano, em maior quantidade na América Latina (CICONINNI, 2013; HENDERSON, 1995). Por sua vocação agrícola, clima e solo diversificado, o Brasil possui uma posição de destaque mundial para a implementação da cadeia produtiva da macaúba (COLOMBO et al., 2018), além de ser uma grande fonte de pesquisas que envolvem sua cadeia produtiva e seu desenvolvimento (NOBRE & WWF-BRASIL, 2022)

Uma das principais características que a diferencia das demais palmeiras oleaginosas é a sua ocorrência em ambientes com elevado déficit hídrico ao longo do ano, sendo considerada, portanto, uma alternativa promissora para a produção de óleo vegetal em regiões onde outras espécies como palma (*Elaeis guineenses*) apresenta baixa aptidão ao clima e solo, e baixa produtividade (BARBOSA, 2021).

Praticamente todas as partes da macaúba podem ser aproveitadas, sendo produtos promissores para as indústrias de produção de alimentos, rações, biocombustíveis, cosméticos e farmacêuticas, que buscam alternativas de matérias primas sustentáveis (SOUZA et al., 2018). Esta grande variedade de usos proporciona ao agricultor uma diversidade de produtos e maior segurança para lidar com a oferta e demanda dos mercados internos e externos. Esta espécie possui uma taxa de germinação bem superior às outras espécies de palmáceas, garantindo assim o maior sucesso e perenização da cultura (APARECIDA et al., 2013).

### **3.3. Ocorrência da espécie**

As informações referentes à distribuição geográfica da macaúba foram obtidas através da composição de dados de herbários, referentes ao território brasileiro, que são alimentados pela comunidade científica como: SpeciesLink; GBIF; DryFlor; Re flora; Bien. Esses dados oferecem informações de ocorrência com a geolocalização dos levantamentos realizados.

Realizou-se, posteriormente, um tratamento desses dados levantados a partir de uma reamostragem pelo método do vizinho mais próximo, para que fossem organizados em pixels de tamanho igual a 10 km x 10 km e que os dados não ficassem sobrepostos. Onde havia a ocorrência de pelo menos uma planta, implicou no pixel receber o valor 1, caso contrário, zero.

### **3.4. Base de Dados**

Os pontos georreferenciados referentes à ocorrência da macaúba provenientes do levantamento realizado pelos herbários foram utilizados nos dados de cada variável climática e pedológica estudada, de modo que, os valores armazenados em cada pixel referentes a cada uma das variáveis foram sobrepostos aos pontos de ocorrência, extraídos e identificados.

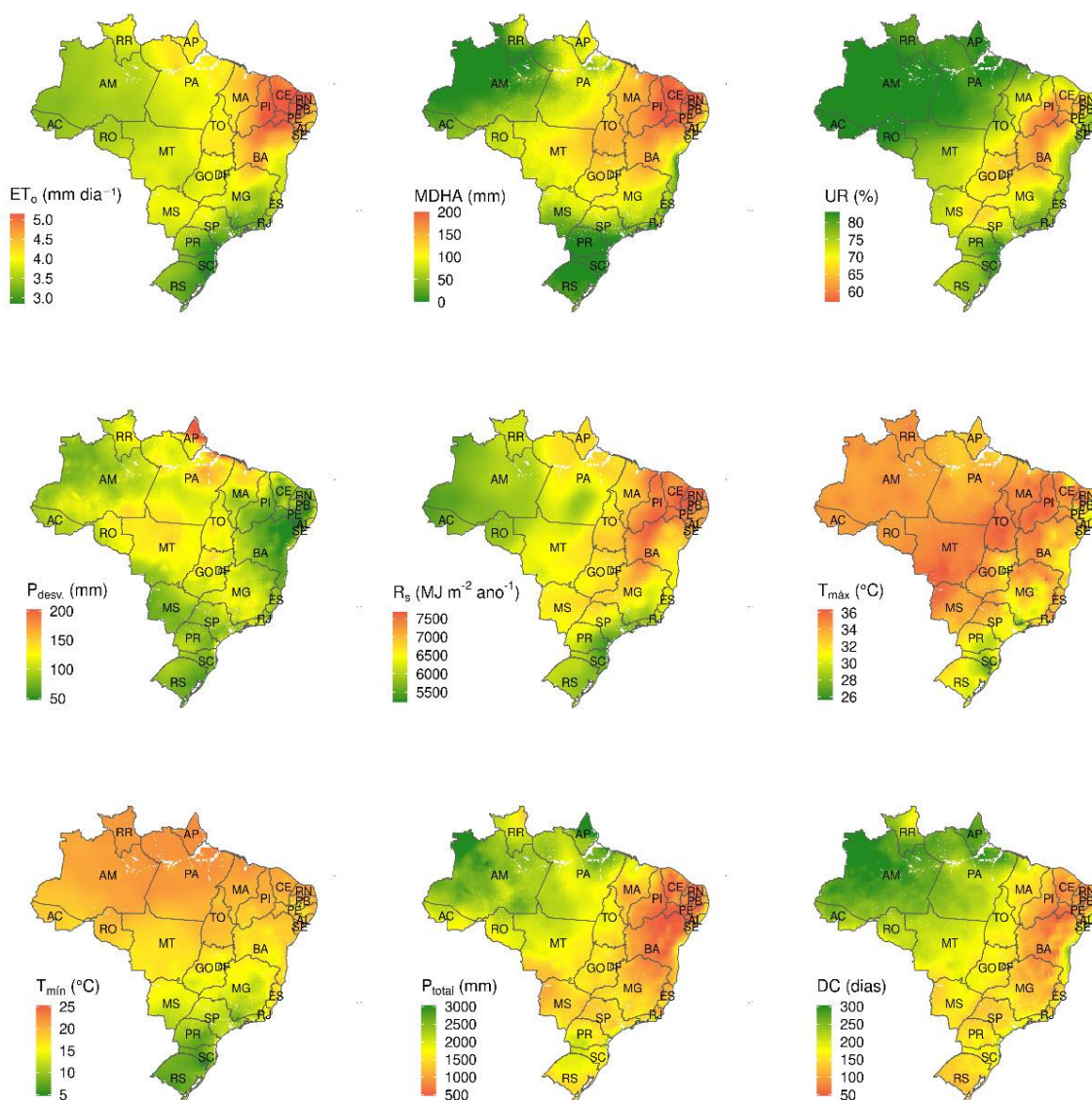
Essa identificação foi feita por meio do software de informação geográfica ArcGIS 10.5 onde foi possível realizar a extração de fatores como clima, solo, precipitação, radiação, etc. que são fatores que interferem em sistemas de cultivo e sua taxa de sobrevivência e sucesso (BARBOSA, 2021). Desse modo buscou-se entender quais características edafoclimáticas são necessárias para que uma área tenha maior chance de sobrevivência para o cultivo da macaúba.

#### **3.4.1. Dados do Clima**

Para caracterizar o clima das regiões de estudo, utilizou-se os dados de precipitação anual, temperatura média do ar anual, temperatura mínima média do mês mais frio, temperatura máxima média do mês mais quente, radiação solar anual, umidade relativa do ar média anual e a evapotranspiração de referência média anual representados pela Figura 2, provenientes do grupo Clima, publicado por Xavier et al. (2016) e de processamento de dados desse trabalho. Esses dados são apresentados na resolução de 0,25° x 0,25° (cerca de 25 km no equador) referentes a uma série histórica de 40 anos (1981 a 2015 para índices pluviométricos e 1981 a

2020 para os demais dados), obtidas das mais de 9 mil estações pluviométricas e mais de 700 estações meteorológicas distribuídas em todo o território brasileiro sendo operadas por agências estaduais e federais.

Figura 2. Representação gráfica da distribuição das principais variáveis estudadas no território brasileiro.



Fonte: Autor

### 3.4.2. Dados de Solo

Para essa caracterização, utilizou-se o mapa dos tipos de solo do Brasil, provenientes da plataforma gratuita do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), considerando

como base o 1º nível categórico que diferencia o território brasileiro em 13 classes distintas, sendo elas: Latossolos, Argissolos, Neossolos, Nitossolos, Cambissolos, Plintossolos, Gleissolos, Espodossolos, Vertissolos, Planossolos, Luvisolos, Organossolos e Chernossolos. Para a análise de solo, por se tratar de uma variável discreta, observou-se a quantidade de ocorrência em cada uma das classes para se realizar a análise da adaptabilidade.

Utilizou-se como base também, um mapa de gradiente textural das regiões de ocorrência da macaúba, obtido da base dos dados espaciais do SoilGrids (POGGIO, 2021), dado utilizado para se chegar ao máximo déficit hídrico acumulado (MDHA) que foi obtido por meio do balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955). O balanço hídrico estima a disponibilidade de água no solo por meio de análise simultânea da precipitação, da evapotranspiração potencial e da capacidade máxima de armazenamento de água no solo.

### **3.5. Zoneamento Edafoclimático**

Para este trabalho, utilizamos 4 modelos diferentes para realizar o zoneamento da distribuição da espécie com o intuito de se chegar no mapa final de zoneamento edafoclimático. O zoneamento edafoclimático é uma ferramenta que pode ser utilizada no planejamento do cultivo de espécies (FILPI, 2019). Ela é realizada por meio do levantamento dos fatores que mais impactam o desenvolvimento ou sobrevivência de determinada espécie baseadas nas características dos solos, topografia, declividade e clima. Quando as condições edafoclimáticas de uma região são descritas, regiões climaticamente semelhantes podem ser definidas, e, ao se identificar regiões semelhantes que possuem uma grande concentração de ocorrência da espécie, podem ser apontadas as melhores regiões para aquela espécie, servindo de suporte para que o plantio de uma dada espécie possa ser adotado com maior segurança (DOS SANTOS et al., 2020; LUIZ et al., 2019).

Para este trabalho, foram utilizados 4 modelos diferentes para realizar o zoneamento de distribuição da espécie com o intuito de se chegar no mapa final de zoneamento edafoclimático. Os modelos adotados são amplamente utilizados para essa finalidade e foram utilizados 4 tipos diferentes para reduzir o viés de cada um dos modelos separadamente. Para se chegar ao resultado final da adaptabilidade da macaúba, aplicou-se a média entre os dados zoneamentos gerados por cada modelo, a fim de se reduzir o viés, gerando um resultado com maior confiabilidade.

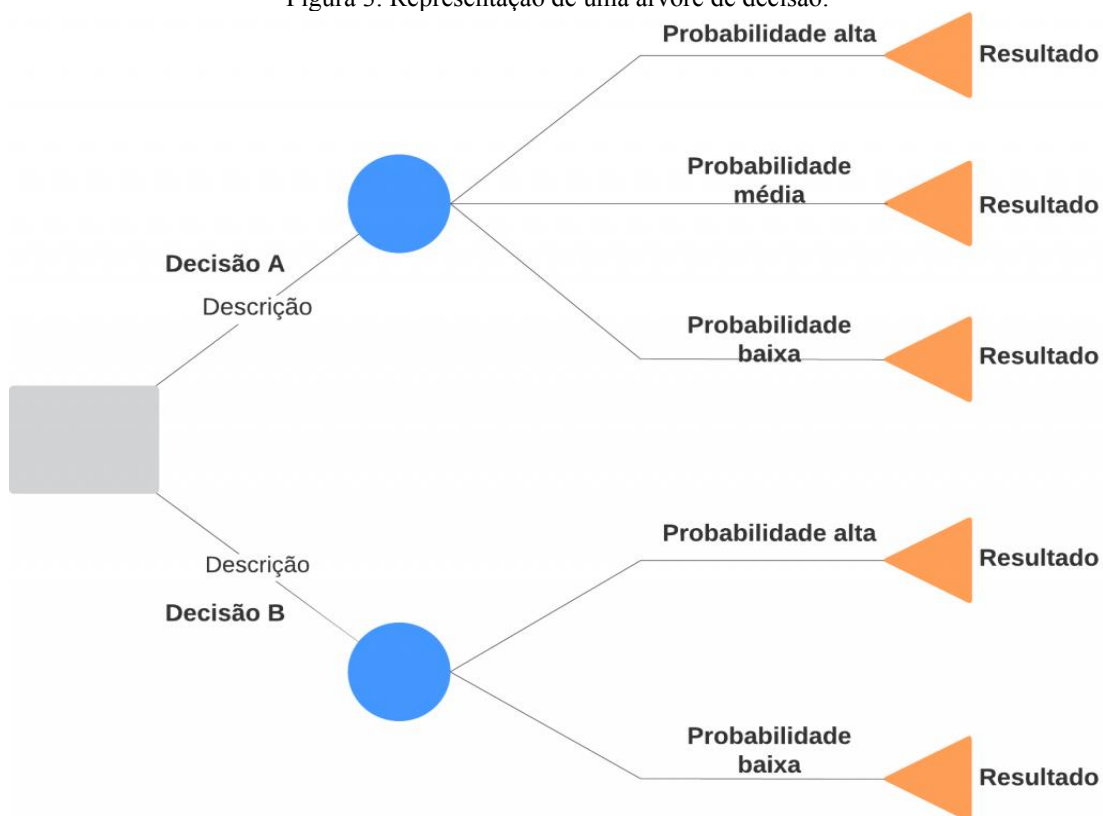
### 3.5.1. Aplicação dos modelos para o zoneamento

#### 3.5.1.1. Random Forest

Random Forest é um algoritmo classificador de *machine learning*, que trabalha com uma combinação simplificada das árvores de decisão, com flexibilidade e aleatoriedade para melhorar a precisão. O modelo Random Forest é uma técnica não paramétrica, desenvolvida por Breiman (2001) para melhorar o desempenho de predição do modelo da técnica de segmentação CART (Classification and Regression Trees), que consiste de uma combinação de muitas árvores classificadoras (floresta), em que diversas árvores são combinadas e que onde cada árvore é gerada a partir de um vetor aleatório, analisado de forma independente e com a mesma distribuição para todas as árvores na floresta (NGUYEN et al., 2021).

Uma árvore de decisão pode ser considerada como uma representação gráfica para um processo de decisão (Figura 3). As árvores são formadas pelo modelador, e contêm as informações (perguntas), os nós são um tipo de condição verificadora, que através dele, cria-se um fluxo de verificação, o nó raiz é o nó que possui maior importância e, que, a partir dele, ramificam-se os nós filhos, até que esses não possuam nenhum ramo e sejam considerados um nó terminal. O atributo mais importante para iniciar a árvore e os atributos subsequentes são obtidos através do cálculo de entropia e de ganho de informação.

Figura 3. Representação de uma árvore de decisão.



Fonte: <https://www.homemmaquina.com.br/como-montar-uma-arvore-de-decisao/>.

Cada árvore possui sua subdivisão determinada com base em um subconjunto de variáveis escolhidas aleatoriamente a partir do total de predições existentes, ou seja, há uma aleatoriedade na seleção de atributos ao invés da seleção a partir do cálculo de impurezas. O resultado final consiste da média dos resultados para valores numéricos e frequência para valores categóricos de todas as árvores.

Para a utilização desse algoritmo, três parâmetros precisam ser definidos: o número de árvores na floresta (*ntree*), número de variáveis utilizadas em cada árvore (*mtry*) e o número mínimo de dados em cada nó terminal (*nodesize*). Os valores dos parâmetros adotados foram os padrões do modelo dentro do programa R.

O método baseia-se na entrada de pontos de ocorrências e ausências da espécie de estudo, este modelo auxilia na escolha das características mais importantes e remoção das menos importantes na construção da análise.

Ao se gerar os pontos com seus determinados valores de probabilidade, foi adotado um ponto de corte de 0,5, ou seja, pixels que receberam um valor maior ou igual a 0,5 foram tomados sendo representantes da presença da macaúba.

### 3.5.1.2. Logitreg

Logitreg, ou regressão logística, é um método estatístico que tem como objetivo produzir um modelo que permita a predição de valores tomados por uma variável categórica a partir de um conjunto de observações, em função de uma ou mais variáveis independentes contínuas e/ou binárias. Então, a partir desse modelo gerado é possível calcular ou prever a probabilidade de um evento ocorrer, dado uma observação aleatória.

A principal diferença da regressão logística para a regressão linear é que a variável dependente na regressão logística é categórica e sendo frequentemente binária (dicotômica), assumindo, portanto, dois valores, que são frequentemente tratados como “sucesso” ou “fracasso” (SILVEIRA et al., 2021). Estes dois valores representam um evento que depende do estudo de caso, a presença ou a não presença, no caso deste trabalho a ocorrência da macaúba. Áreas que receberam um valor maior que 0,5 foram tomadas como sucesso, nesse caso, a presença da macaúba.

É uma técnica que avalia a probabilidade de obtenção de uma das categorias da variável dependente, portanto, é capaz de obter a probabilidade de ocorrência de determinado evento, assim como a influência de cada variável independente no evento estudado.

### 3.5.1.3. MaxEnt

O modelo Maxent, ou algoritmo de máxima entropia, utiliza o princípio da máxima entropia nos dados de presença da espécie para estimar um conjunto de funções que se conectam com as condições favoráveis à ocorrência dessa espécie (FITZPATRICK et al, 2013). O princípio da máxima entropia diz que a melhor aproximação para uma distribuição de probabilidades ainda desconhecida é aquela que satisfaça qualquer restrição às condições (PHILLIPS et al. 2006).

Esse é um método eficaz em calcular a distribuição potencial de uma determinada espécie ao longo de uma área de estudo (DALAPICOLLA, 2015). Esse modelo permite trabalhar apenas com pontos de ocorrência georreferenciados e as variáveis selecionadas como entrada e a partir disso, o próprio modelo cria pseudo pontos para gerar o resultado para a espécie em estudo, nesse trabalho foram escolhidos os pontos de não ocorrência, não permitindo o modelo o fazer.

Os dados disponíveis sobre a distribuição da espécie (dados de ocorrência) representam um conjunto de dados que são tidos como verdades e suas faixas de ocorrência são os valores esperados para cada variável estudada na distribuição da espécie.

Utilizando esse modelo, os pontos de ocorrência da macaúba foram cruzados com os dados espaciais edafoclimáticos para extração das informações de cada variável para cada ponto. Com esses dados extraídos, o modelo cria um banco baseado na ocorrência natural da macaúba com o intuito de estimar a aptidão da cultura no mapa. Com esse banco de dados, o modelo cria um conjunto de dados de treinamento e teste (70% para calibração e 30% para validação/teste), utilizando-se desses bancos de dados para medir a efetividade do modelo e validá-lo.

#### **3.5.1.4. Análise de cluster**

A análise de cluster, é uma das metodologias mais tradicionais de classificação, tanto pela facilidade computacional quanto de entendimento do método. Para a realização do zoneamento edafoclimático pela análise de cluster, utilizou-se uma metodologia criada por Filpi (2019), onde os dados espaciais referentes a cada variável de clima e de solo são reclassificados por meio da inferência Fuzzy, que consiste em uma análise multicritério que estabelece intervalos de melhor adaptabilidade às variáveis levantadas, sem estabelecer limites rígidos entre classes (CHENG, C.; CHAN, C. H.; LIN, 2006). Considerou-se nesse estudo adaptabilidade como sendo as áreas de maior recorrência de forma natural da macaúba.

A metodologia Fuzzy realiza a padronização dos fatores por meio de funções de pertinência, que podem ser: triangular, trapezoidal, cauchy e sigmoidal. Dentre elas, a função sigmoidal possibilita representar, na escala de 0 a 1, pequenas variações em uma transição gradual, não linear e contínua (JIANG E EASTMAN, 2000), sendo esta função utilizada neste trabalho.

Para atribuir os pesos das variáveis ambientais, os dados espaciais de cada variável edafoclimática foram divididos em quatro regiões climáticas homogêneas a partir do método de clusterização K-means, que é um algoritmo de clusterização (ou agrupamento) não supervisionado (que não precisa de input de confirmação externo) que avalia e agrupa os dados de acordo com suas características. Após essa etapa, os pesos de cada variável foram estabelecidos em função da distribuição espacial dos pontos de ocorrência da Macaúba nos

mapas já clusterizados, em que, quanto mais homogênea foi a distribuição dos pontos ao longo das quatro regiões (*clusters*), menos restritiva a variável para a sobrevivência da espécie, logo, menor o seu peso.

Uma vez gerados os pesos, realizou-se o zoneamento edafoclimático da macaúba, resultado da integração das variáveis utilizadas. A integração das variáveis foi realizada por meio do método de soma ponderada. O diferencial do método de análise de cluster é que nesse método se tem uma maior flexibilidade na definição de áreas de adaptabilidade, define-se faixas em que a espécie pode sobreviver através das variáveis estudadas, enquanto os outros métodos acima trabalham através do estudo de probabilidade de ocorrência da espécie pelos dados de atual padrão de ocorrência, explicam o motivo dela se encontrar naquela determinada região.

### **3.6. Resultado final do zoneamento**

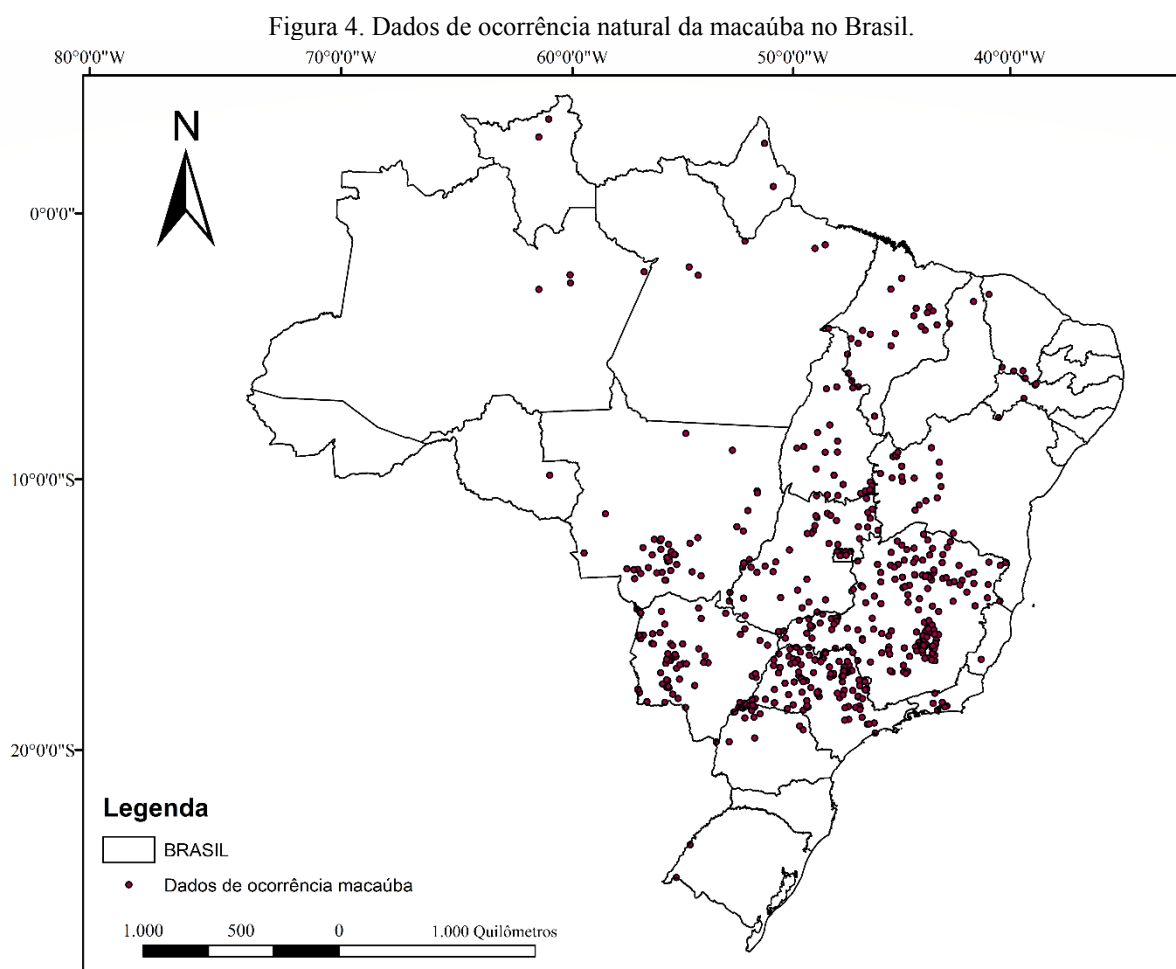
Para cada modelo foi adicionado manualmente os pontos de ausência para a calibração dos modelos, onde foram adotados pontos que distavam no mínimo 5 km dos pontos de ocorrência. Após cada modelo foi calibrado com as variáveis edafoclimáticas para realizar o zoneamento ambiental da macaúba e foi gerado os dados de adaptabilidade segundo cada método. A representação do resultado de adaptabilidade ou possibilidade de existência da macaúba variou entre os valores de 0 - 1 em cada um dos modelos.

O mapa final de adaptabilidade utilizado foi gerado através do resultado da média dos dados espaciais dos modelos de distribuições apresentados acima. Este mapa indica quais as áreas no território brasileiro que oferecem as melhores condições para sobrevivência e/ou áreas com maior possibilidade de ocorrência da macaúba. Para a classificação do mapa final de adaptabilidade adotou-se intervalos que indicam as melhores chances de ocorrência e aquelas em que se definiu como áreas que não são tão propícias para o cultivo da espécie. Neste caso, as áreas que possuíam um valor de pixel maior ou igual a 0,5 e menor que 0,75 foram definidas como média adaptabilidade enquanto que as áreas de valor de pixel maior igual a 0,75 foram definidas como alta adaptabilidade. Já as áreas com pixels que receberam valor menor que 0,5 representaram áreas em que o sucesso da macaúba é pequeno.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Distribuição geográfica da macaúba

A partir dos dados obtidos dos herbários citados na metodologia, foi criada uma representação gráfica (Figura 4) apontando a ocorrência natural da macaúba no território brasileiro. Após a reamostragem realizada, encontrou-se um número de 428 pontos de ocorrência da macaúba.



Fonte: Autor.

Pode-se verificar uma maior concentração da ocorrência da macaúba nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil como levantado por Henderson et al. (1995). Grande parte da região onde a macaúba se encontra faz parte do bioma Cerrado. Nele, o teor de água do solo reflete diretamente na estrutura da vegetação (PINHEIRO & DURIGAN, 2009). Este bioma é composto, em sua maior parte, por uma vegetação mais baixa e espaçada e com um regime de chuvas favoráveis ao cultivo da macaúba (PLATH et al., 2016; TELES et al., 2011).

Outro ponto importante a destacar da região do Cerrado é a grande quantidade de áreas de pastagens degradadas, principalmente devido ao mau uso do solo (PERON & EVANGELISTA, 2003). Nesse bioma destaca-se também um grande desenvolvimento da pecuária e altos investimentos em monoculturas como a soja e o milho nessas regiões (ANDRADE et al., 2016).

#### 4.2. Variáveis edafoclimáticas

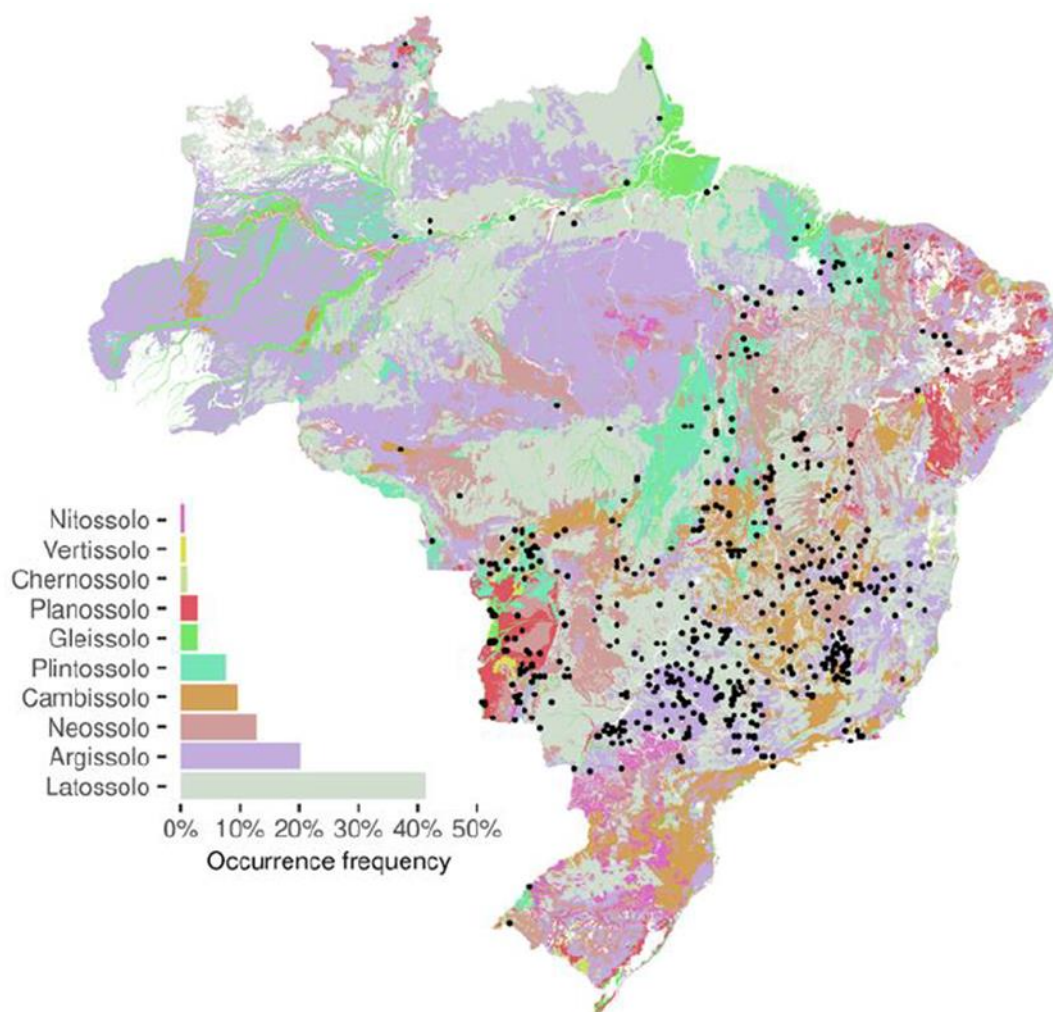
Os dados de ocorrência da macaúba foram sobrepostos aos dados edafoclimáticos indicados na metodologia e a partir disso foi possível realizar a extração dos valores representantes de cada pixel e dessa forma, pôde-se evidenciar as faixas de ocorrência de cada variável edafoclimática estudada.

Esses valores foram ordenados e representados aqui na forma de valor mínimo, máximo e mediano de cada variável, conforme a Tabela 1, enquanto na Figura 5, uma vez que o tipo de solo se trata de uma variável categórica, apresentou-se a frequência de ocorrência da macaúba em cada classe de solo.

Tabela 1. Faixas de ocorrência da macaúba para cada variável edafoclimática levantada. ET equivale a evapotranspiração, MCWD equivale a média do déficit hídrico, RH equivale a umidade relativa,  $P_{std}$  equivale a o desvio padrão de chuva diária,  $R_g$  equivale a radiação solar,  $T_{max}$  equivale a temperatura máxima,  $T_{min}$  equivale a temperatura mínima, P equivale a precipitação.

Variável	Unidade	Mínimo	Mediana	Máximo
ET	(mm)	3,17	3,86	4,46
MCWD	(mm)	13	86	148
RH	(%)	64	71	78
$P_{std}$	(mm)	71	104	141
$R_g$	(MJ m <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup> )	5828	6567	7231
$T_{max}$	(°C)	30,17	33,44	36,32
$T_{min}$	(°C)	10,83	14,08	17,94
P	(mm ano <sup>-1</sup> )	758	1378	1803
WD	(dias)	82	142	196
Altitude	(m)	13	511	1224

Figura 5. Mapa de distribuição da macaúba para cada tipo de solo.



Fonte: Autor.

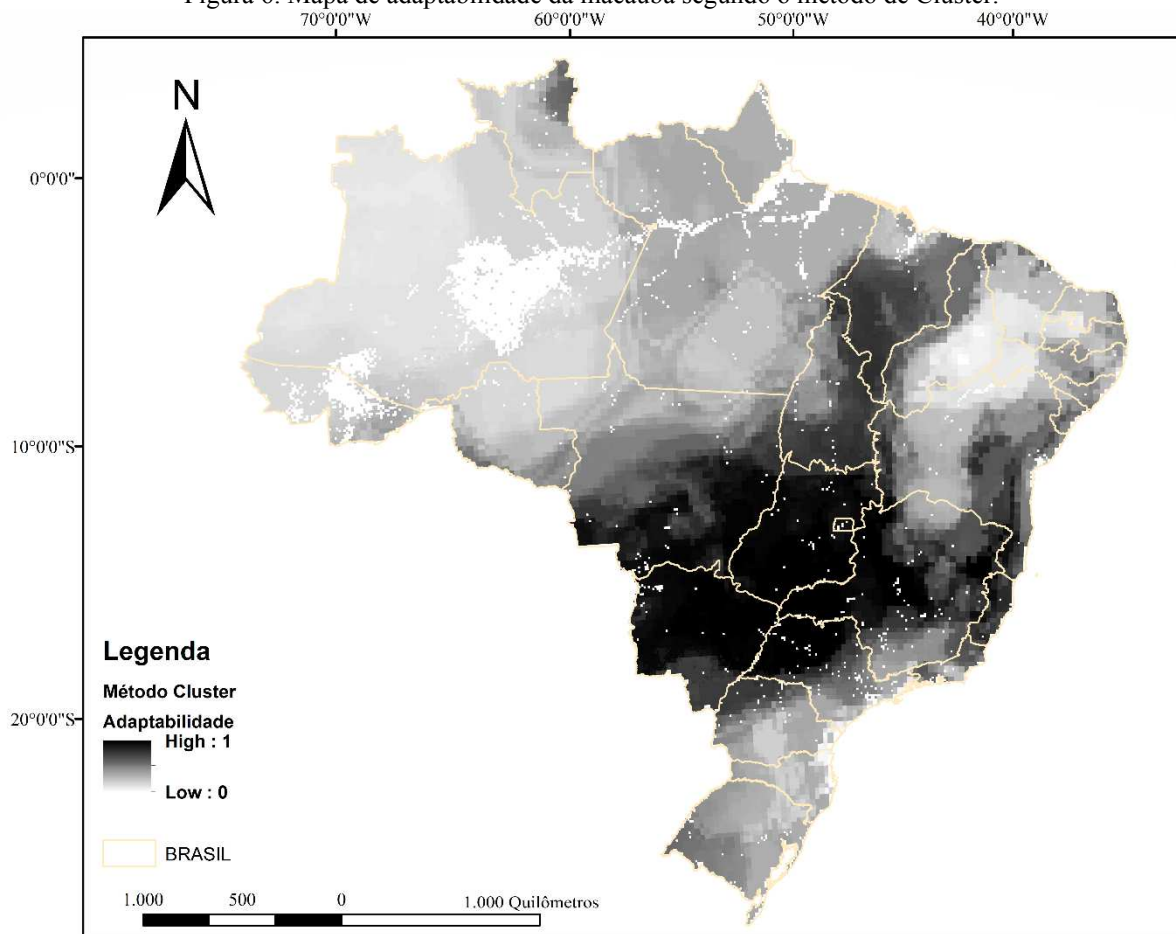
Uma vez que grande parte do território do bioma Cerrado é composto por latossolos, é conveniente esperar que a macaúba possua uma frequência de ocorrência expressiva nesse tipo de solo. Deve-se levantar uma discussão mais aprofundada sobre o motivo da região amazônica ter poucos pontos de observação, se de fato há a não ocorrência ou se existe uma dificuldade de se obter dados nessa região. As faixas de valores de temperatura mínima e precipitação são confirmadas por Filpi (2019) onde, em um estudo do estado de Minas Gerais, encontrou uma faixa ótima de adaptabilidade entre 15,4 - 17,8 para a temperatura mínima média anual e uma faixa ótima de precipitação entre 1.141 – 1.565 milímetros ao ano. Teles (2011) encontrou uma maior ocorrência da macaúba em Minas Gerais em áreas de Latossolo e Neossolo.

### 4.3. Modelos de zoneamento

A posse dos dados das faixas de ocorrência permitiu elaborar, por meio dos modelos Logitreg, Random Forest, Análise de Cluster e o de Máxima Entropia a elaboração dos mapas de adaptabilidade do cultivo de macaúba nas regiões do Brasil de acordo com cada um dos 4 modelos utilizados.

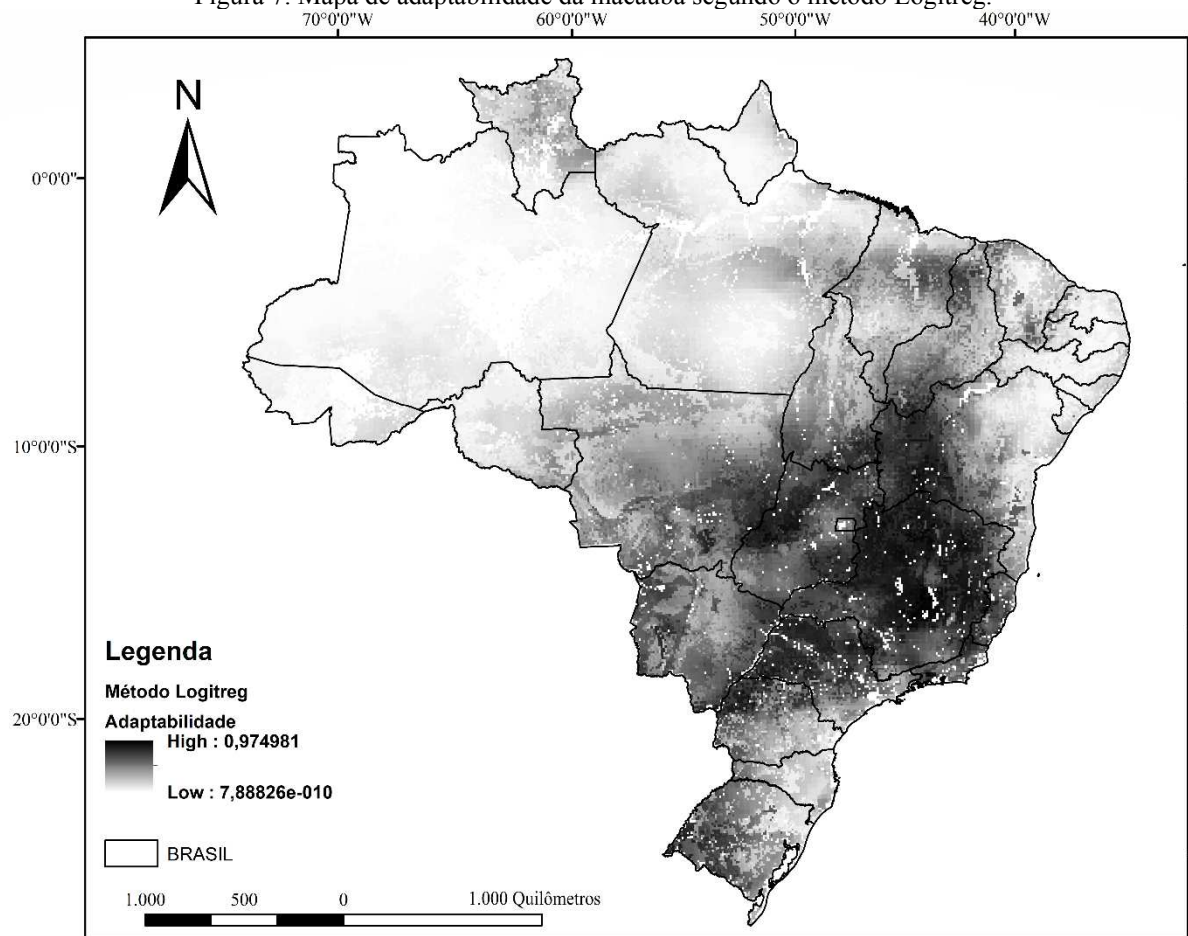
Abaixo, encontram-se os mapas representantes dos resultados de adaptabilidade para estes modelos, conforme as Figuras 6, 7, 8 e 9. Quanto mais escuro o pixel dos mapas, mais apto a área para o plantio ou maior a chance de sobrevivência da espécie.

Figura 6. Mapa de adaptabilidade da macaúba segundo o método de Cluster.



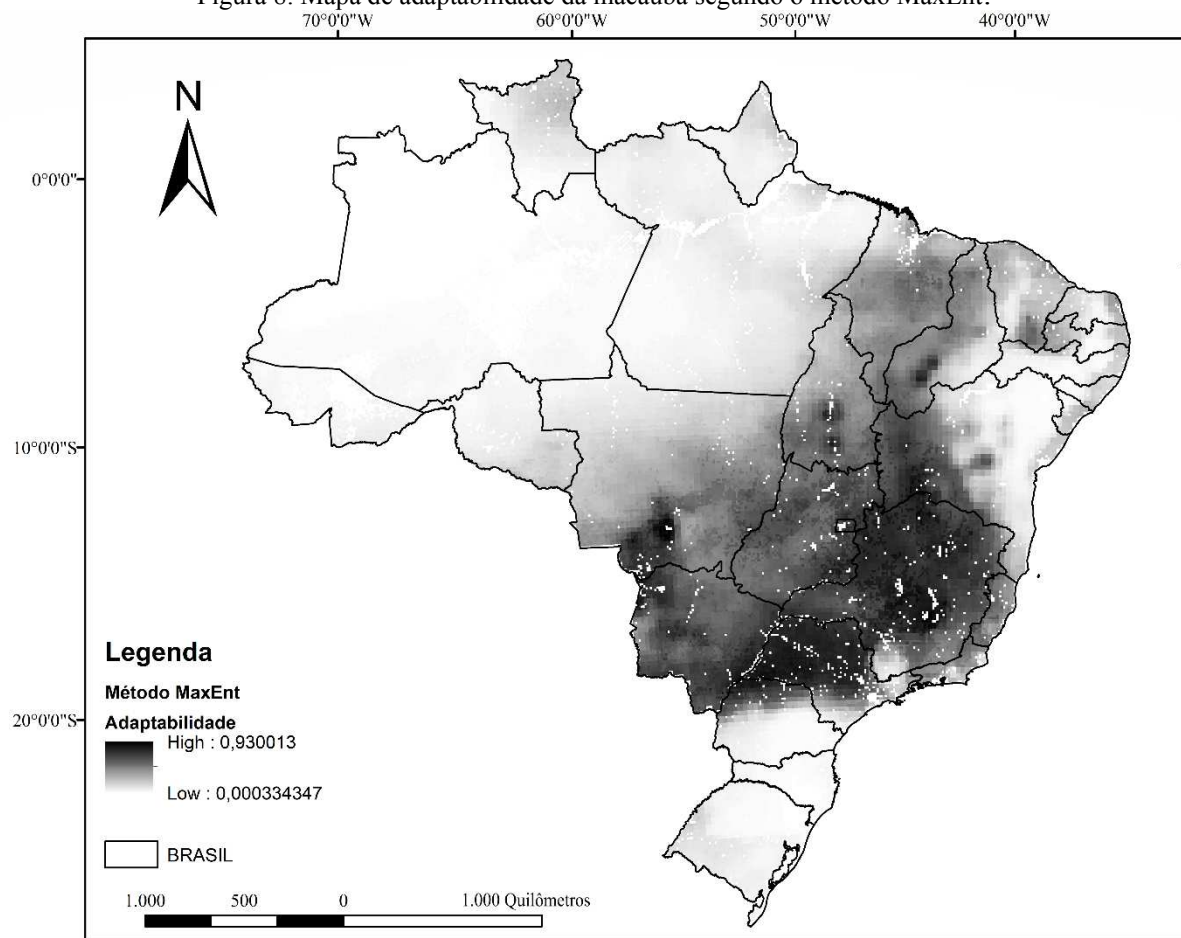
Fonte: Autor.

Figura 7. Mapa de adaptabilidade da macaúba segundo o método Logitreg.



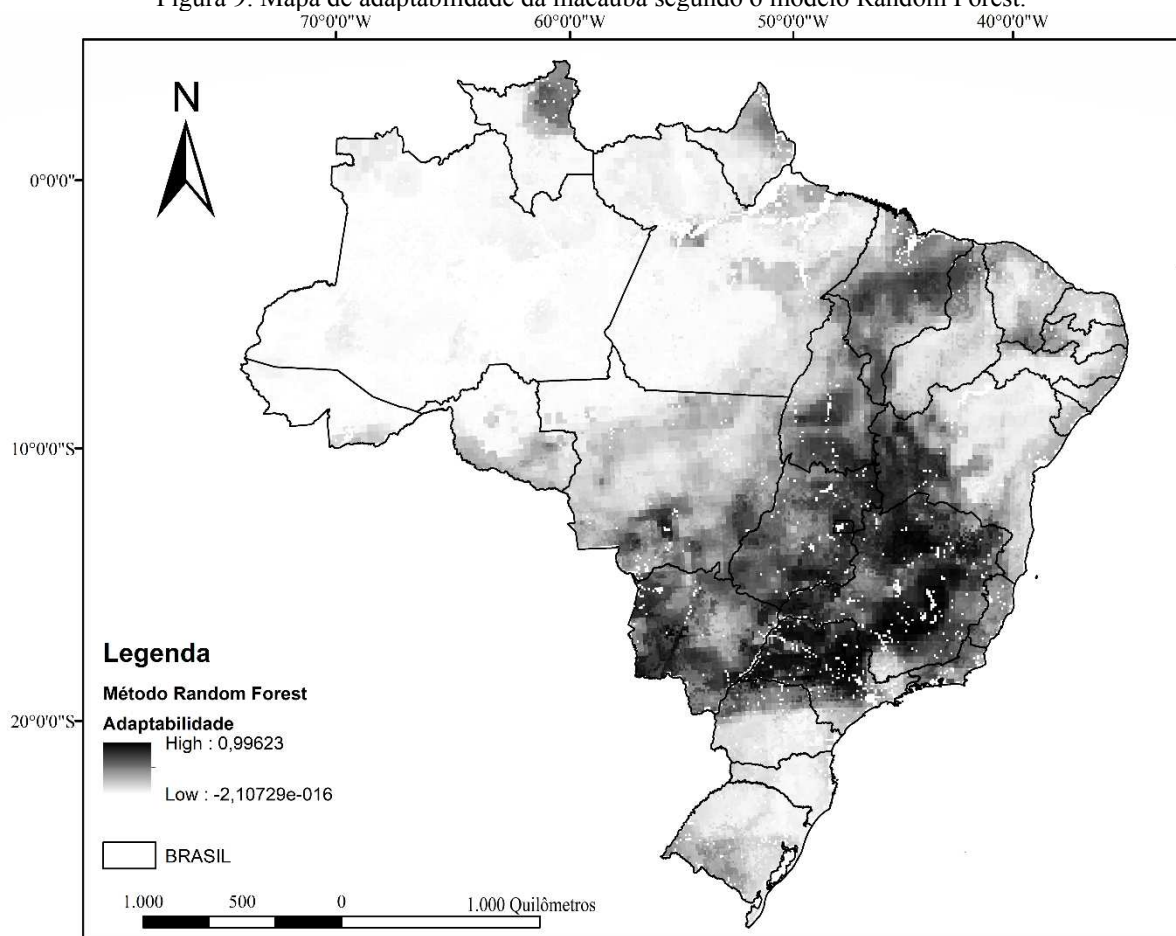
Fonte: Autor.

Figura 8. Mapa de adaptabilidade da macaúba segundo o método MaxEnt.



Fonte: Autor.

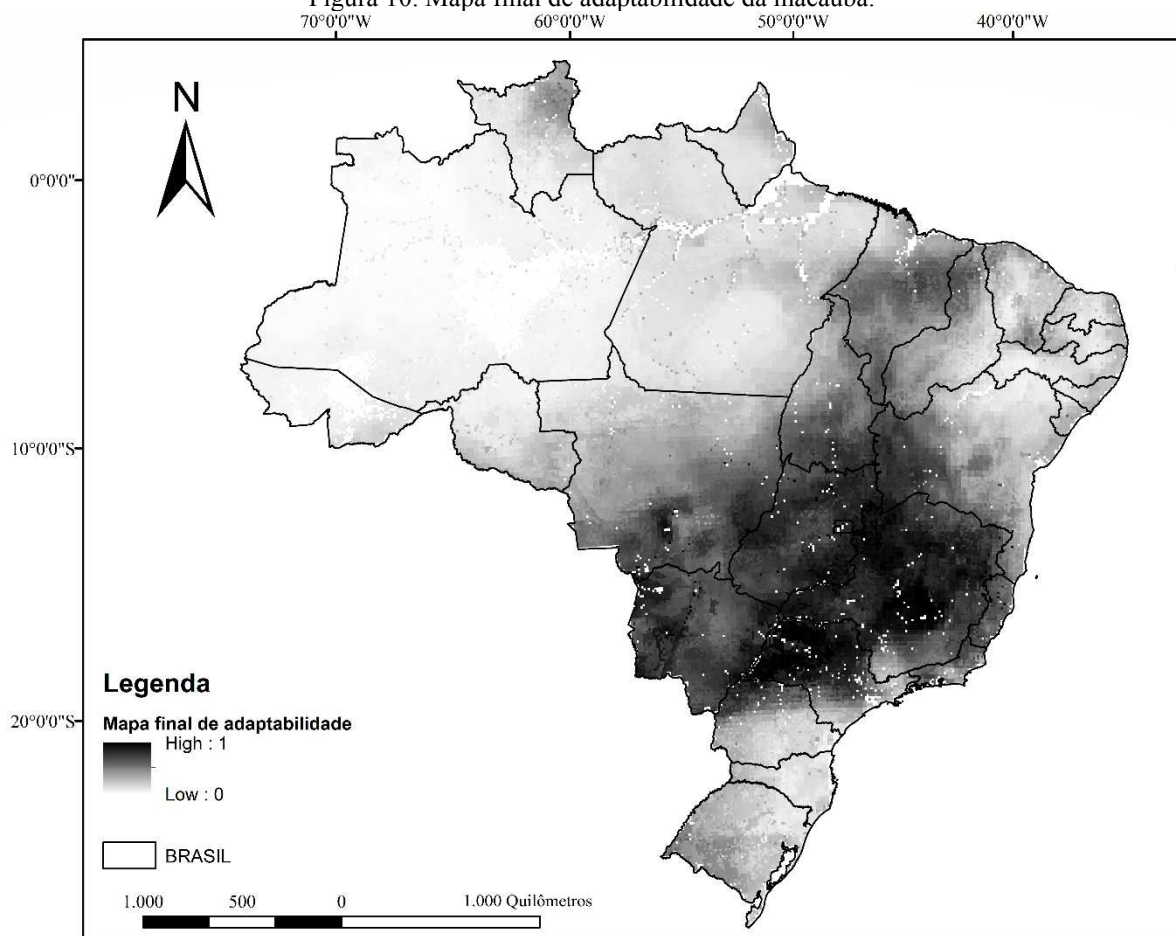
Figura 9. Mapa de adaptabilidade da macaúba segundo o modelo Random Forest.



Fonte: Autor.

Cada um dos métodos utilizados possui suas características, propensões e lógica que levam ao resultado final e, com o intuito de diminuir as incertezas e inclinações de cada um dos resultados dos modelos, e melhorar o resultado, o mapa final de adaptabilidade foi considerado como sendo o resultado da média pixel a pixel de cada um dos dados espacializados dos modelos, representado na Figura 10 abaixo.

Figura 10. Mapa final de adaptabilidade da macaúba.



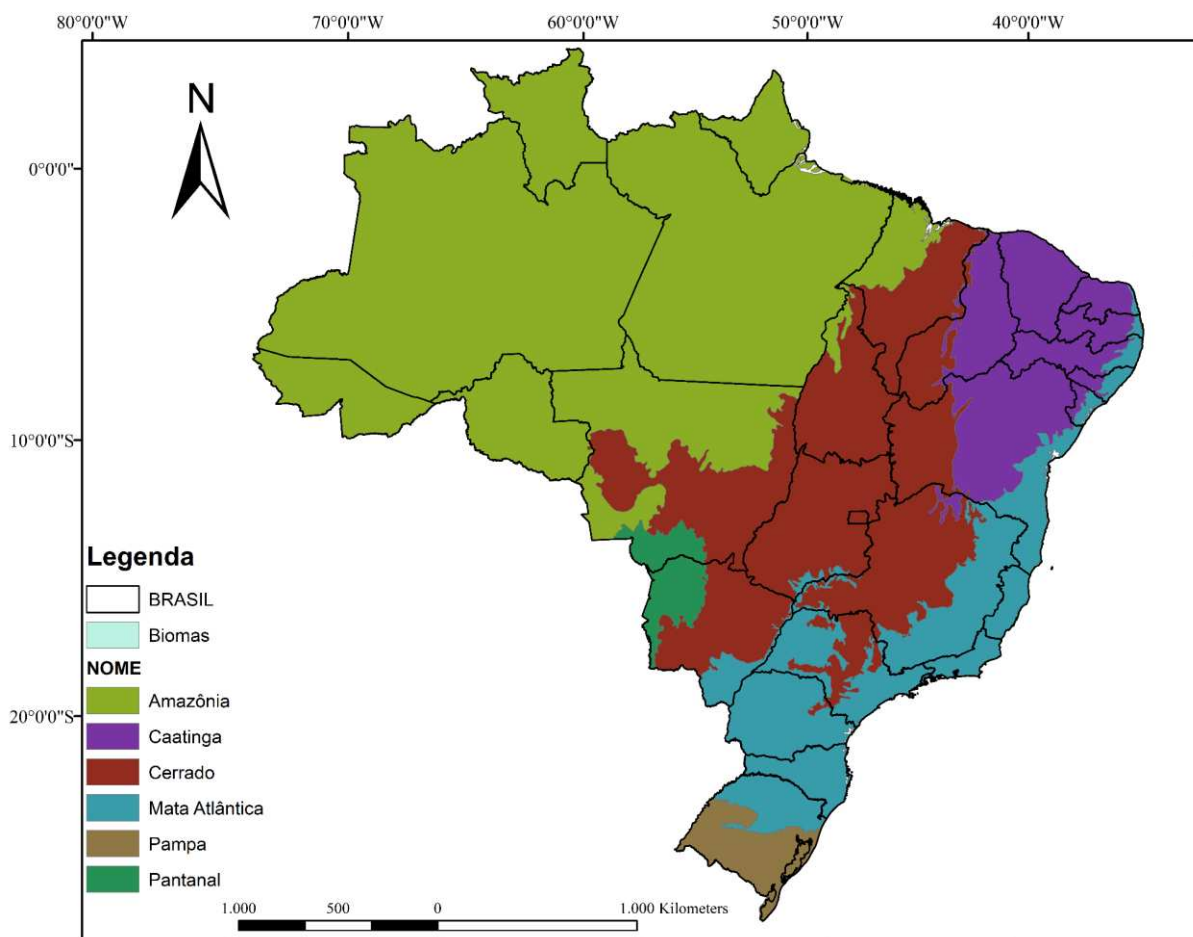
Fonte: Autor.

Destaca-se, do mapa final de adaptabilidade, a semelhança que as áreas mais escuras têm com a área que o bioma Cerrado abrange no território brasileiro apresentada na Figura 11 abaixo. Pode-se propor algumas respostas referentes a não observância de pontos de ocorrência na região Norte, e por consequente uma área representada como baixa adaptabilidade para a macaúba como a dificuldade de obtenção de dados dentro das florestas e a distribuição dos assentamentos e grandes centros urbanos próximos ao leito dos rios. Combinações entre variáveis climáticas e do solo são outro fator que pode explicar esse resultado para a região amazônica, uma alta pluviosidade com solos de baixa taxa de percolação ou que tenham sofrido processo de compactação podem fazer com que a espécie não consiga se desenvolver.

No Nordeste, especificamente nas áreas de Caatinga, há um efeito oposto, um baixo índice pluviométrico com solos arenosos que proporcionam uma ótima infiltração, o que dificulta para a espécie extrair a água necessária para o seu desenvolvimento, enquanto que a região Sul, pode-se inferir que por possuir uma baixa temperatura mínima média anual poderia atuar na taxa de sobrevivência da espécie. Essa mesma relação de temperatura e índices

pluviométricos foi observada por Filpi (2019) em um estudo feito para o estado de Minas Gerais.

Figura 11. Biomas do Brasil.



Fonte: Autor.

Pode-se verificar também que, diferente da palma de óleo africana, que necessita de um grande volume pluviométrico para o seu desenvolvimento, a macaúba pode se adaptar a regiões com menores índices pluviométricos, corroborando com a ideia dessa espécie ser uma eficiente alternativa para os impactos do cultivo do óleo de palma africano.

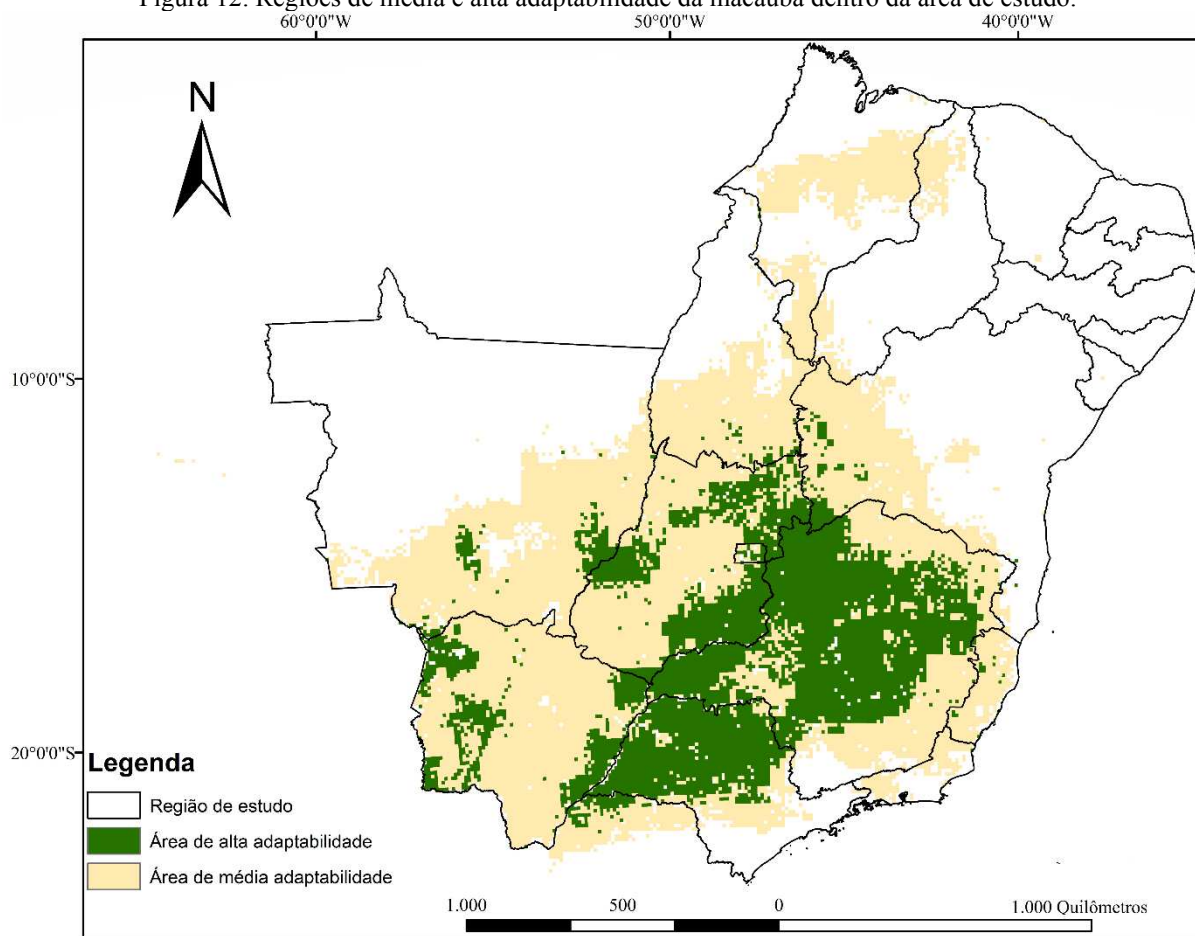
A região de maior adaptabilidade da macaúba apresentada no mapa é uma área de uso extensivo da agropecuária (ANDRADE, 2016), porém a espécie permite o desenvolvimento de forma conjunta com outras culturas, logo, surge como uma alternativa para a diferenciação nas lavouras e da possibilidade de oferecimento de serviços ambientais em áreas que não são capazes de sustentar outra cultura ou pastos em estado de degradação.

#### **4.4. Áreas de melhor adaptabilidade**

A partir dos dados espacializados apresentados no tópico 4.3, verificou-se que as áreas de maior de maior aderência se encontram nas regiões Sudeste, Centro-Oeste, extremo norte do Paraná, sul do Tocantins e parte do Maranhão, sendo essas consideradas a nossa região de interesse do trabalho. Utilizando o mapa final de adaptabilidade da macaúba, a partir da região de interesse, realizou-se uma segregação entre duas bandas de probabilidade de ocorrência. Adotou-se dois intervalos de adaptabilidade, um mais restrito, considerando um grau de adaptabilidade maior ou igual a 0,75, representando as áreas de maior confiança para o desenvolvimento da macaúba, e outro intervalo menos restritivo, considerando valores de adaptabilidade entre 0,5 e 0,75, abordado uma área mais abrangente.

O mapa resultante dessa reclassificação se encontra na Figura 12 abaixo. Cada pixel das imagens abaixo representam uma área de 100x100 metros.

Figura 12. Regiões de média e alta adaptabilidade da macaúba dentro da área de estudo.



De posse desse resultado, pôde-se estimar que, segundo a classificação feita por este trabalho na região de estudo, mais de 74 milhões de hectares são classificados como áreas de alta adaptabilidade para a macaúba, enquanto ao considerarmos o intervalo de adaptabilidade média e alta juntas, foi encontrado um valor de mais de 232 milhões de hectares, representados na tabela 2 abaixo.

Esse valor é relativamente próximo ao encontrado de 192 milhões de hectares por Plath et, al. (2016), essa diferença pode ser resultado da data de levantamento feito pelo autor (2013) que obteve apenas 271 pontos georreferenciados mas também por ter utilizado apenas um modelo para realizar o zoneamento, neste caso, o MaxEnt.

Tabela 2. Quantidade de áreas aptas ao plantio da macaúba.

<b>Adaptabilidade</b>	<b>Área (ha)</b>
Média	158 milhões
Alta	74 milhões

Destaca-se aqui novamente que esse resultado deve ser levado como um indicador de possíveis áreas para cultivo da macaúba, um primeiro passo para que o investidor tenha uma base de lugares por onde começar. O estudo de áreas de maior produtividade deve ser feito posteriormente quando esses dados de produtividade dessas áreas estiverem disponíveis.

Por se tratar de uma espécie de fácil cultivo, há diversos pontos de ocorrência em áreas modificadas, áreas degradadas e áreas próximas de rodovias (SCARIOT, 1991), servindo como mais um ponto a ser levado em consideração quando pensado na macaúba como alternativa ao cultivo e a substituição por áreas de baixa produtividade.

## **5. CONCLUSÃO**

No Brasil, a macaúba apresentou ampla distribuição geográfica de acordo com os dados obtidos dos herbários, com ocorrência principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, com predominância no domínio do Cerrado.

A partir resultados dos modelos de zoneamento, há uma menor probabilidade de se encontrar a espécie em áreas como na região Norte e de regiões mais secas como a Caatinga no Nordeste, assim como também a chance de sobrevivência da macaúba na região Sul é menor, podendo estar relacionada com as baixas temperaturas mínimas médias que não são favoráveis ao desenvolvimento da espécie.

O principal resultado do trabalho foi o levantamento da grande quantidade de áreas que possuem algum grau de adaptabilidade que favoreça a existência da macaúba no território brasileiro, o estudo mostrou que este valor ultrapassa 200 milhões de hectares de áreas que teriam potencial para se tornar áreas de cultivo e que poderiam gerar os benefícios apresentados pelo plantio da espécie.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRADE, R. G.; BOLFE, ÉDSON LUIS; VICTORIA, D. DE C.; NOGUEIRA, S. FURLAN. Pastagens No Cerrado. **Agroanalysis (UFV)**, v. 36, p. 30–33, 2016.
- APARECIDA, E. et al. Estimativa de sequestro de carbono numa população espontânea de palmeiras macaúba. **8º Congresso Internacional de Bioenergia**, v. 1, p. 3–8, 2013.
- BARBOSA, M. A. M. Ecofisiologia, frutificação e produtividade da macaúba: Um estudo sobre a influência de fatores ambientais e práticas agrícolas. 2021. 154 f. **Tese (Doutorado em Fitotecnia)** - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2021.
- BRASIL. (2017). **Lei Nº 13.576**, de 26 de dezembro de 2017.
- CASAROLI, D.; ROSA, F. de O.; ALVES, J.; EVANGELISTA, A. W. P.; BRITO, B.V. de; PENA, D. S. Aptidão edafoclimática para o Mogno-Africano no Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 357 - 368, 2018.
- CHENG, C.; CHAN, C. H.; LIN, K. Intelligent agents for e-marketplace: Negotiation with issue trade-offs by fuzzy inference systems. **Decision Support Systems**, v. 42, n. 2, p. 632–638, 2006.
- CICONINNI et al. Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the cerrados and pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Ind. Crops Prod**, v. 45, p. 208-214, 2013.
- COLOMBO, C. A. et al. Macauba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. **EDP Sciences**, v. 25, n. 1, p. 9, 2018.
- CNA (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil) – ; CEPEA (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada). **PIB DO AGRONEGÓCIO CRESCEU ABAIXO DAS PROJEÇÕES**. 2021. Disponível em: < <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx> >.
- CRIA (Centro de Referência e Informação Ambiental). 2011. **Specieslink** - simple search. Disponível em <http://www.splink.org.br/index> (Acesso em 02/10/2020).
- DOS SANTOS, G. M. et al. Edaphoclimatic zoning: Methodology and application to apple cultivation in a Brazilian watershed. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 2, p. 190–200, 2020. <https://doi.org/10.14393/rbcv72n2-48890>
- DRYFLOR (2012–) Latin American Seasonally Dry Tropical Forest. **Floristic Network website**. Available at <http://www.dryflor.info/> Accessed on "07/08/2020".
- DUBREUIL, V., FANTE, K. P., PLANCHON, O.; NETO, J. L. S. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015, *Confins* [En ligne], 37 | 2018, mis en ligne le 11 octobre 2018, consulté le 31 juillet 2022. URL : <http://journals.openedition.org/confins/15738> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/confins.15738>

EMBRAPA. Visão 2030 - o futuro da agricultura brasileira. **Embrapa**, p. 212, 2018.

EMBRAPA. **O agro brasileiro alimenta 800 milhões de pessoas, diz estudo da Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/59784047/o-agro-brasileiro-alimenta-800-milhoes-de-pessoas-diz-estudo-da-embrapa>>. Acesso em: 8 set. 2022.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Plano decenal de expansão de energia 2030**. Brasília, DF: EPE, 2020. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicação490/PDE%202030\\_RevisaoPosCP\\_rv2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicação490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf).

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. **Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable**. Rome, FAO. 2022\_ <https://doi.org/10.4060/cc0639en>

FILPI, H. E. F. C. M. Zoneamento Edafoclimático em Cenários de Mudanças Climáticas para a seleção de espécies em projetos de recomposição florestal em Minas Gerais, Brazil. Universidade Federal de Viçosa. **Dissertação de mestrado**. 2019.

FITZPATRICK, M. C., GOTELLI, N. J., & ELLISON, A. M. MaxEnt versus MaxLike: Empirical comparisons with ant species distributions. *Ecosphere*, 4(5). (2013). <https://doi.org/10.1890/ES13-00066.1>

GBIF Secretariat: GBIF Backbone Taxonomy. <https://doi.org/10.15468/39omei> Accessed via <https://www.gbif.org/species/5284517> on 13 August 2020.

HENDERSON, A. ; G. G. R. B. **Field Guide to the Palms of the Americas**. New Jersey: Princeton University, 1995. v. 21

HOLT-GIMÉNEZ, E. et al. We Already Grow Enough Food for 10 Billion People... and Still Can't End Hunger. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 36, n. 6, p. 595–598, 2012.

HOLT-GIMÉNEZ, E., SHATTUCK, A., ALTIERI, M., HERREN, H., & GLIESSMAN, S. We Already Grow Enough Food for 10 Billion People... and Still Can't End Hunger. **Journal of Sustainable Agriculture**, 36(6), 595–598. (2012) <https://doi.org/10.1080/10440046.2012.695331>

IBGE. **Áreas territoriais**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?t=saiba-mais-edicao&c=1>>. Acesso em: 4 out. 2022.

INDUSTRYARC.. **Soybean Oil Market - Forecast(2022 - 2027)**. (2020). [https://www.industryarc.com/Report/16642/soybean-oil-market.html?https://www.industryarc.com/Report/16642/soybean-oil-market.html&gclid=Cj0KCQjwsrWZBhC4ARIsAGGUJuq1JmXHBt6zLtFCz\\_2m69JQ7r6mk9aGoOMNLXaGJ53nx9AnzYUHFxMaAlhuEALw\\_wcB](https://www.industryarc.com/Report/16642/soybean-oil-market.html?https://www.industryarc.com/Report/16642/soybean-oil-market.html&gclid=Cj0KCQjwsrWZBhC4ARIsAGGUJuq1JmXHBt6zLtFCz_2m69JQ7r6mk9aGoOMNLXaGJ53nx9AnzYUHFxMaAlhuEALw_wcB)

ISRIC — World Soil Information, Wageningen, the Netherlands, 802, 2015.

JOHNS HOPKINS BLOOMBLERG SCHOOL OF PUBLIC HEALTH. (n.d.). **History of Agriculture**. Retrieved September 9, 2022, from <https://www.foodsystemprimer.org/food-production/history-of-agriculture/>

KOPPEN, W., 1936: Das geographische System der Klimate.– KOPPEN, W., R. GEIGER (Eds.): **Handbuch der Klimatologie**. – Gebruder Borntraeger, Berlin, 1, 1–44, part C.

LUIZ, A. et al. Zoneamento edafoclimático da cultura do melão. **Tese de Doutorado**. 2019.

MCDONALD, B. L. **Food security**. United Kingdom: Polity Press, 2010.

MORDOR INTELLIGENCE. **Mercado de Óleo Vegetal - Crescimento, Tendências, Impacto Covid-19 e Previsões (2022 - 2027)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/vegetable-oil-market#:~:text=Prevê-se que o mercado,que afetam todos os setores>>.

MOREIRA, S. L. S. et al. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020a.

MOREIRA, S. L. S. et al. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020b.

NGUYEN, J.-M. et al. Random forest of perfect trees: concept, performance, applications and perspectives. **Bioinformatics**, v. 37, n. 15, p. 2165–2174, 2021.

NOBRE, S.; WWF-BRASIL. **Viabilidade da macaúba para a produção de biocombustível**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/resumoexecutivo\\_macauba\\_final\\_pt.pdf](https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/resumoexecutivo_macauba_final_pt.pdf)>.

OECD. **Effective carbon prices**. [s.l: s.n.]. v. 9789264196

PAIVA, A.O., REZENDE, A.V., PEREIRA, R.S. Estoque de carbono em Cerrado Sensu stricto do Distrito Federal. **Rev. Arvore** 35, 527 e538. 2011.

PERON, A. J.; EVANGELISTA, A. R. DEGRADAÇÃO DE PASTAGENS EM REGIÕES DE CERRADO Pasture degradation in savanna's regions. **Ciência agrotecnica**, v. 28, n. 3, p. 655–661, 2003.

PHILLIPS, S. B., ANEJA, V. P., KANG, D., & ARYA, S. P. Modelling and analysis of the atmospheric nitrogen deposition in North Carolina. **International Journal of Global Environmental Issues**, 6(2–3), 231–252. (2006).  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>

PLATH, M. et al. A novel bioenergy feedstock in Latin America? Cultivation potential of *Acrocomia aculeata* under current and future climate conditions. **Biomass and Bioenergy**, v. 91, p. 186–195, 2016.

POETSCH, J. et al. *Acrocomia aculeata* – a sustainable oil crop. **Rural** 21, p. 41–44, 2012.

POGGIO, L., de SOUSA, L. M., Batjes, N. H., HEUVELINK, G. B. M., KEMPEN, B., RIBEIRO, E., and ROSSITER, D.: SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, **SOIL**, 7, 217–240, 2021

REFLORA - **Herbário Virtual. Disponível** em:  
<https://reflora.jbrj.gov.br/reflora/herbarioVirtual/> Acesso em 19/11/2020.

ROSS, J. L. S. **Geografia do Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

SAMPAIO, M. DA S. et al. Uso de Sistema de Informação Geográfica para comparar a classificação climática de Koppen-Geiger e de Thornthwaite. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 405–417, 2011.

SANTERAMO, F. G.; LAMONACA, E. Food Loss – Food Waste – Food Security : A New Research Agenda. **Sustainability**, v. 13, p. 4642, 2021.

SANTOS ET AL. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l: s.n.].

SCARIOT, A. O., LLERAS, E., & HAY, J. D.. *Reproductive Biology of the Palm *Acrocomia aculeata* in Central Brazil*. **JSTOR** (Vol. 23, Issue 1). (1991). <http://www.jstor.org>  
 URL:<http://www.jstor.org/stable/2388683>.

SILVEIRA, M. B. G. , BARBOSA, N. F. M., PEIXOTO, A. P. B., XAVIER, É. F. M., & XAVIER JUNIOR, S. F. A. Aplicação da regressão logística na análise dos dados dos fatores de risco associados à hipertensão arterial. **Research, Society and Development**, 10(16), e20101622964. (2021). <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.22964>

SOUZA, P. T. DE; ANSOLIN, M.; TUBINO, M. **Binary Blends of Biodiesel from Macauba** . v. 29, n. 2, p. 240–247, 2018.

TELES, H. D. F. et al. Ambientes De Ocorrência Natural De Macaúba. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 4, p. 595–601, 2011.

UNDP & IPCC. **The Heat Is on: Taking Stock of Global Climate Ambition**. New York: [s.n.].

THORNTWAITE, C.W.; MATHER, Jr. The Water Balance. **Laboratory of Climatology, Centerton, NJ, USA**. 1955.

UNITED NATIONS. The sustainable development goals report 2019. **United Nations Publication Issued by the Department of Economic and Social Affairs**, 68. (2019). <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022.pdf>.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

ZION MARKET RESEARCH. Palm Oil Market Analysis By Derivative (Crude Palm Oil, Palm Kernel Oil, Palm Kernel Cake, And Others), And For Edible Oil, Cosmetics, Bio-Diesel, Lubricants, Surfactants And Other Applications - Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis, And Forecast, 2015-2021. [s.l: s.n.]. Disponível em:  
[https://www.zionmarketresearch.com/sample/palm-oil-market#utm\\_source=KAVITACMYK&utm\\_medium=zmr&utm\\_campaign=01april](https://www.zionmarketresearch.com/sample/palm-oil-market#utm_source=KAVITACMYK&utm_medium=zmr&utm_campaign=01april).

## **CAPÍTULO 2 – Modelagem da quantidade e valoração do sequestro de carbono do cultivo de macaúba (*Acrocomia aculeata*) em áreas de pastagem degradada no Brasil**

**Resumo** - Diminuir a taxa em que CO<sub>2</sub> é lançado na atmosfera terrestre e mitigar os impactos relacionados a essa ação são atividades que necessitam serem feitas imediatamente e cada vez mais. Uma das maneiras de se incentivar essa operação são os programas de pagamentos por serviços ecossistêmicos e mecanismos de captura e sequestro de carbono, que visam valorar os benefícios obtidos da natureza direta ou indiretamente, para remunerar situações onde há a proteção desses serviços. Diversos serviços ecossistêmicos estão sendo ameaçados gradativamente pela atividade humana. Há uma estimativa de que os serviços ecossistêmicos possuam uma oferta de serviço de um valor de mais de US\$125 trilhões por ano globalmente. O sequestro de carbono como um serviço de eco-regulação da quantidade de carbono na atmosfera vem diminuindo ao longo do ano devido a destruição dos sistemas naturais. No Brasil, cerca de 130 milhões de hectares são áreas que estão susceptíveis a erosão e empobrecimento contínuo do solo e, a substituição de áreas de pastagens degradadas por áreas de cultivo pode atrair investimentos de empresas interessadas na economia verde. Este trabalho serve como um primeiro passo para um caminho de desenvolvimento da macaúba como sendo uma fonte de renda para agricultores e empresas, com impacto direto no sequestro de carbono, mas também em outros serviços ecossistêmicos. O valor de carbono estocado para plantas da macaúba de 9 anos atinge a marca de 61,6 toneladas de carbono por hectare, e, ao se avaliar áreas de pastagens degradadas com adaptabilidade para o cultivo dessa espécie, os valores chegam a aproximadamente 9 milhões de hectares para as áreas de alta adaptabilidade e 30 milhões de hectares para as áreas de média adaptabilidade. O modelo InVEST utilizado nesse trabalho aponta que há uma possibilidade de ganhos de €13.095 por hectare, indica também que a estimativa de ganho total no Brasil ao se multiplicar a quantidade de áreas aptas de pastagem degradada pelo ganho que essa mudança acarretaria chegaria ao valor de €130,95 bilhões e €405,94 bilhões considerando áreas de alta e média adaptabilidade, respectivamente. Por poder contribuir com a recuperação de áreas degradadas e melhorar serviços ecossistêmicos prestados na região, ao mesmo tempo em que possui o potencial de suprir diversas indústrias e aumenta a resiliência do produtor, deve-se avaliar ações para incentivar a produção e consolidar as cadeias de produção que utilizam a macaúba.

Palavras-chave: InVEST. Sequestro de carbono. Serviços ecossistêmicos. Valoração ambiental.

## **CHAPTER 2 – Modeling the amount and valuating the carbon sequestration from macaúba cultivation (*Acrocomia aculeata*) in degraded pasture areas in Brazil**

**Abstract** - Decreasing the rate of which CO<sub>2</sub> is released into the earth's atmosphere and mitigating the impacts related to this release are activities that need to be done immediately and more and more. One of the ways to encourage this operation is the payment programs for ecosystem services and carbon capture and sequestration mechanisms, which aims to value the benefits obtained from nature directly or indirectly, to remunerate situations where there is the protection of these services. Several ecosystem services are gradually being threatened by human activity. It is estimated that ecosystem services have a service offering worth more than US\$125 trillion a year globally. Carbon sequestration as an eco-regulation service of the quantity of carbon in the atmosphere has been decreasing throughout the year due to the destruction of natural systems. In Brazil, about 130 million hectares are areas that are susceptible to erosion and continuous impoverishment of the soil, and, the replacement of degraded pasture areas by cultivation areas can attract investments from companies interested in the green economy. This work serves as a first step towards the development of macaúba as a source of income for many farmers and companies, with a direct impact on carbon sequestration but also on other ecosystem services. The value of carbon stored in a 9-year-old macaúba plants reaches the mark of 61.6 tons of carbon per hectare, and, when evaluating areas of degraded pastures with high adaptability for the cultivation of this species, the values reach approximately 9 million hectares and 30 million hectares for areas of medium adaptability. The InVEST model used in this work points out that there is a possibility of gains of approximately €13,095 per hectare, it also indicates that the estimate of total gain in Brazil, when multiplying the amount of areas suitable for degraded pasture by the gain that this change should entail would reach the value of €130.95 billions and €405.94 billions considering areas of high and medium adaptability, respectively. As it can contribute to the recovery of degraded areas and improve ecosystem services provided in the region, at the same time that it has the potential to supply several industries and increase the producer's resilience, actions must be evaluated to encourage production and consolidate supply chains. production using macaúba.

**Keywords:** InVEST. carbon sequestration. ecosystem services. environmental valuation.

## 1. INTRODUÇÃO

É de extrema importância a consideração de urgência na remoção do CO<sub>2</sub> da atmosfera para evitar ainda mais os impactos das mudanças climáticas (OECD/FAO, 2017; OLIVEIRA et al., 2021). Algumas medidas vêm sendo desenvolvidas para mitigar estes impactos e diminuir a concentração em que o CO<sub>2</sub> é encontrado na atmosfera terrestre (PAUSTIAN et al., 1997), entre eles podemos destacar os programas de pagamentos por serviços ecossistêmicos e mecanismos de captura e sequestro de carbono (MAC DOWELL et al., 2017), que visam valorar os benefícios obtidos da natureza direta ou indiretamente, para remunerar situações onde há a proteção desses serviços. Esta valoração econômica pode ser uma poderosa ferramenta para se adicionar uma proteção de ecossistemas terrestres e marinhos e no desenvolvimento de leis específicas para essa causa.

Por definição, “Serviços ambientais ou ecossistêmicos são aqueles que a natureza presta, ao absorver, filtrar e promover a qualidade da água; ao reciclar nutrientes e assegurar a estrutura dos solos; participar da remoção de carbono; manter a estabilidade do clima, amenizando desastres como enchentes, secas e tempestades...” (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005). Vários serviços ecossistêmicos estão sendo ameaçados cada vez mais pela atividade humana (poluição, urbanização, emissão de gases de efeito estufa), motivo esse que demonstra a importância de se mapear e avaliar esses serviços para avaliação e proteção.

Costanza et. al (2014) e De Groot (2012) estimaram um valor entre US\$ 125 e 140 por ano para os serviços ecossistêmicos em âmbito global. Esses serviços, em geral, são condições e contribuições que os sistemas naturais oferecem e que não são contabilizados no mercado tradicional (NINAN & KONTOLEON, 2016). O sequestro de carbono como um serviço de eco-regulação da quantidade de carbono na atmosfera vem diminuindo ao longo do ano devido a destruição dos sistemas naturais para o aumento das necessidades dos seres humanos por desenvolvimento (FADAEI; MIRSANJARI; AMIRI, 2020).

Áreas de pastagem degradadas são aquelas que perderam ou estão em um processo de diminuição da produtividade e vigor, sem a possibilidade da recuperação natural (MACEDO, 2000). O governo brasileiro assumiu o compromisso de reabilitar mais de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas (PERON & EVANGELISTA, 2003) o equivalente a aproximadamente 10% de toda área de pastagem cultivada no Brasil, além de aumentar em 5 milhões de hectares as áreas agrossilvipastoris até 2030 através do Plano de Agricultura de

Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC) como a principal estratégia para o desenvolvimento sustentável na agricultura (BRAZIL, 2015).

Projetos de sequestro de carbono vinculados a recuperação do uso da terra, em sua maioria, possuem um adicional de co-benefícios além de fato do sequestro de carbono, entre os exemplos temos a conservação da biodiversidade, controle de erosão, aumento da infiltração da água no solo, etc (EHRHART et al., 2008). Incentivos econômicos são a melhor forma de estimular proprietários de terras, gestores e empresas florestais a considerar os impactos do clima nas decisões sobre o manejo das florestas e cultivos (VAN KOOTEN, 2018).

Áreas degradadas de agricultura e áreas abandonadas podem sequestrar o gás carbônico naturalmente, mas o fazem de uma maneira lenta, podendo levar séculos para se chegar a níveis de CO<sub>2</sub> pré-degradação (YANG et al., 2019). Ao se realizar o levantamento dessas áreas de pastagem que não estão sendo utilizadas de maneira produtiva, o zoneamento edafoclimático se torna uma ferramenta interessante para se combinar essas áreas degradadas com as informações das áreas aptas ao plantio de uma determinada espécie.

A substituição de áreas de pastagens degradadas por áreas de cultivos de outras espécies pode atrair investimentos de empresas interessadas na economia verde, na utilização de mercado de carbono, e contribuir para a recuperação dessas áreas. As pastagens consorciadas com a macaúba podem produzir o dobro da produção global de óleo de palma sem a necessidade de desmatamento, recuperando as pastagens, além de recuperar os serviços ecossistêmicos da área (INOCAS, 2020).

O modelo InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs - carbon and sequestration*) tem sido amplamente utilizado como uma ferramenta efetiva para correlacionar as mudanças de uso e cobertura do solo com o estoque de carbono no solo, uma vez que o modelo permite usar a distribuição da densidade de carbono de forma mais global ou regional, ou ainda da variação da vegetação ou do tipo de solo para estimar o estoque de carbono.

Atualmente não existe na literatura um estudo de grande escala com relação ao serviço ambiental que a macaúba pode prestar pela captura e sequestro de carbono ao se substituir pastagens que hoje não exercem o seu papel de forma satisfatória pelo cultivo dessa palmácea. Este trabalho serve como um primeiro passo para um caminho de desenvolvimento da macaúba

como sendo uma fonte de renda para diversos agricultores e empresas, se tratando do cultivo da espécie para sequestro e fixação de carbono.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho foi de levantar dados de áreas de pastagem degradada no Brasil e estimar os ganhos econômicos referentes à captura e estoque de carbono, como serviço ecossistêmico, ao se substituir uma cultura de pastagem degradada pelo cultivo da macaúba.

## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1. Modelo de Valoração InVEST**

O modelo InVEST foi desenvolvido pelo Natural Capital Project, por meio de uma parceria entre as Universidades de Stanford e Minnesota, The Nature Conservancy e World Wildlife Fund, sendo uma ferramenta de modelagem de grande escala, eficaz nas avaliações de balanço econômico e ambiental em diferentes aspectos e de serviços ambientais (BOTTALICO et al., 2016; CHAPLIN-KRAMER et al., 2015).

O modelo permite ao decisor explorar a relação custo-benefício e avaliação de diversos impactos na mudança de parâmetros ambientais, traduzindo em números os resultados dessas mudanças (NELSON et al., 2010) e identificar o investimento em capital natural que pode incentivar o desenvolvimento econômico e a conservação do meio ambiente (DAILY et al., 2009). InVEST possibilita avaliar os serviços ecossistêmicos disponibilizados de uma área de estudo em um momento atual como em situações futuras e com isso ajudar na seleção de estratégias e projetos para investimento nessas regiões.

Para esse trabalho utilizou-se uma funcionalidade específica denominada como Modelo InVEST de sequestro e armazenamento de carbono, que estima a quantidade atual de carbono estocado em uma região e quantifica o montante de carbono sequestrado ao passar do tempo como também é capaz de realizar uma valoração econômica desse serviço prestado (HE et al., 2016). Esse modelo permite retornar um valor econômico da quantidade de carbono sequestrada como um serviço ambiental usando dados econômicos do custo do carbono e taxas anuais de desconto do preço do carbono (CHU et al., 2019). Permite ainda a análise de cenários de acordo

com a *Reducing Emissions from Forest Degradation and Deforestation* (REDD) e REDD+ *frameworks*.

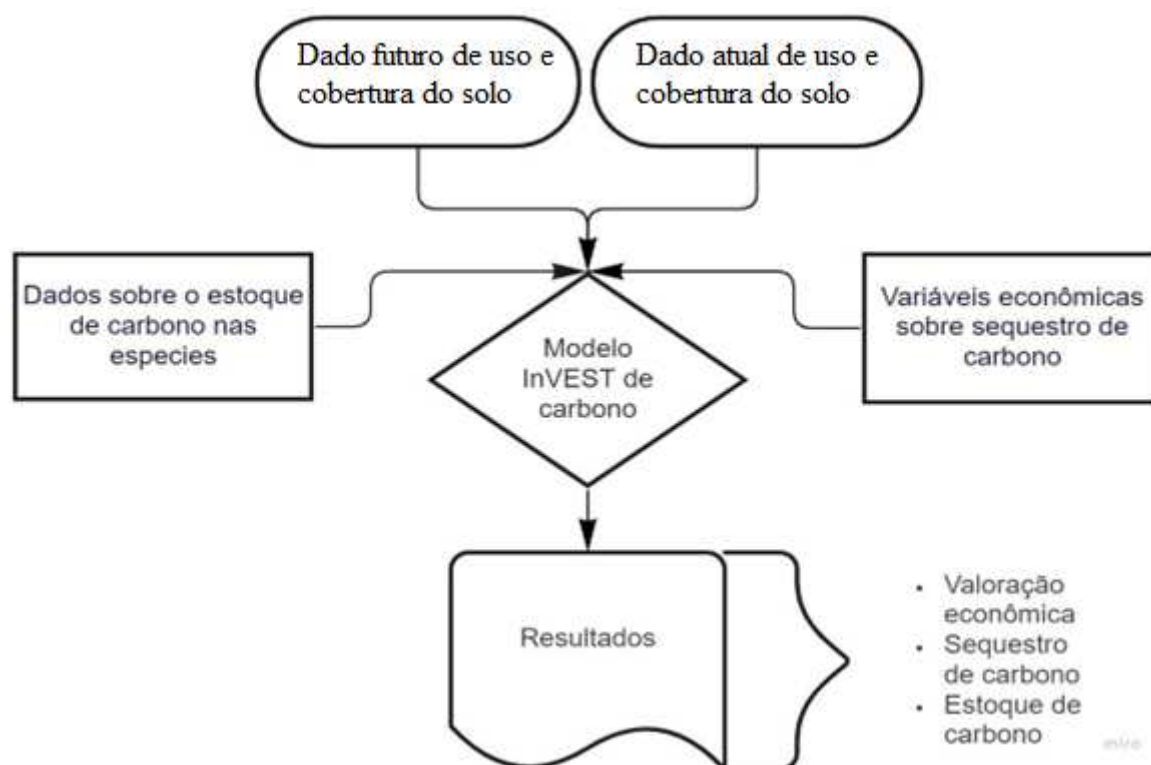
O módulo de sequestro de carbono do modelo InVEST utiliza o ciclo de carbono de forma simplificada para quantificar o carbono estocado e o quanto foi sequestrado ou perdido de acordo com a mudança da porção de carbono no solo, na matéria morta e na biomassa acima e abaixo do solo (NELSON et al., 2014). O modelo calcula a quantidade de carbono em uma determinada área e em um determinado momento, somando os valores da concentração de carbono nas 4 porções explicadas acima.

$$C_{a,l} = A \times (C_{m,l} + C_{s,l} + C_{ac,l} + C_{ab,l}) \quad (1)$$

Onde  $C_{a,l}$  denota a quantidade de carbono total em uma célula pertencente a um determinado uso do solo,  $A$  é a área da célula e  $C_{m,l}$ ,  $C_{s,l}$ ,  $C_{ac,l}$  e  $C_{ab,l}$  representam a quantidade de carbono na matéria morta, a quantidade de carbono estocado no solo, e quantidade de carbono acima e abaixo da vegetação respectivamente para um determinado tipo de uso do solo.

Para isto, a ferramenta deve ser alimentada com 4 tipos específicos de dados, como apresentada na Figura 14 abaixo, sendo eles: O perfil de carbono no solo, chamados de *carbon pools*, que são as estimativas de carbono presente acima e abaixo do solo, a concentração de carbono na matéria morta e quantificação de carbono no solo; dados de uso do solo atual e de previsão futura e; O preço de mercado da tonelada de carbono e suas taxas de desconto no decorrer do tempo.

Figura 13. Fluxograma representando a estrutura hierárquica do modelo InVEST de sequestro e estoque de carbono.



Fonte: Autor.

## 3.2. Base de dados

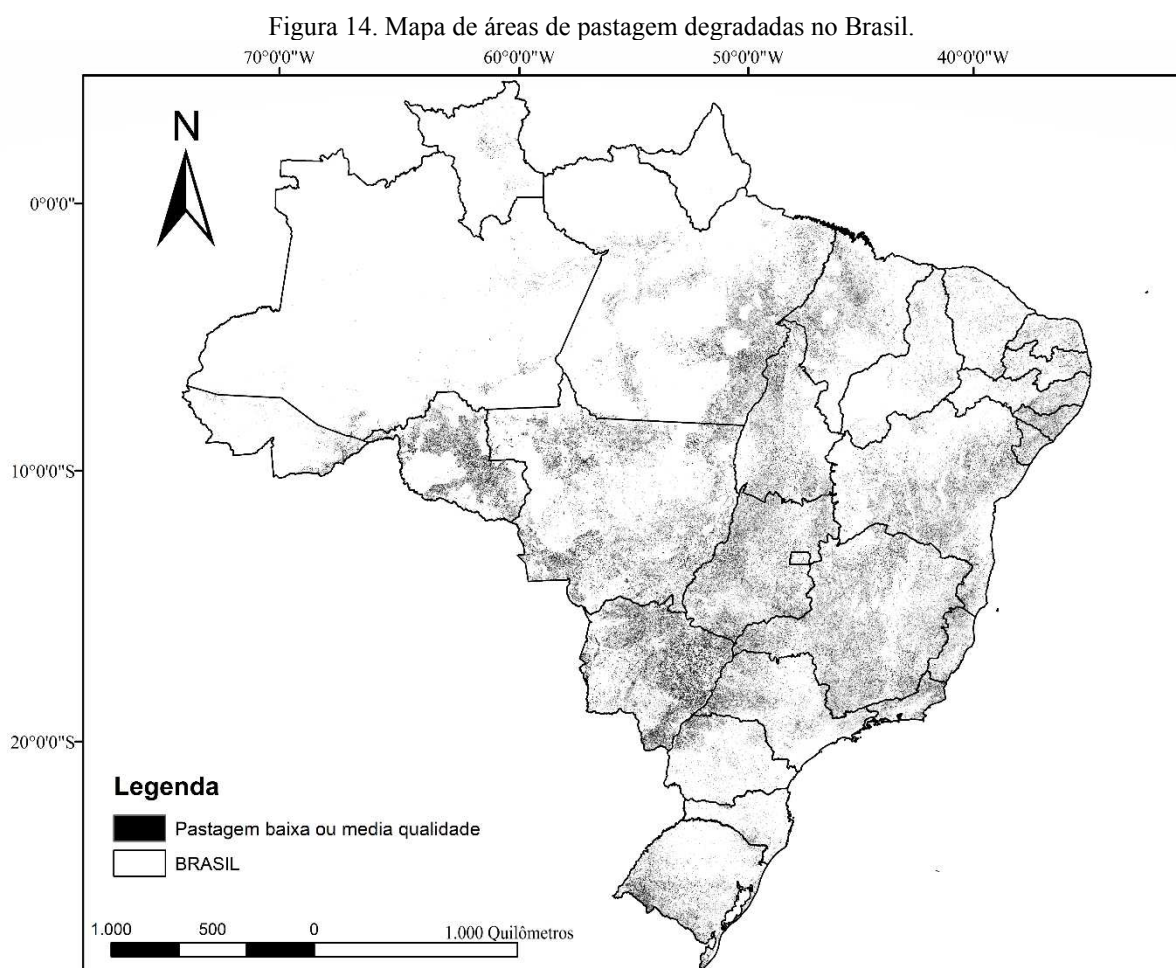
### 3.2.1. Uso e cobertura do solo

No Brasil, cerca de 130 milhões de hectares são áreas que estão susceptíveis a erosão e empobrecimento contínuo do solo (MACEDO et al., 2014). Para o levantamento das áreas degradadas do território brasileiro, utilizou-se dados processados proveniente do MapBiomias, de onde foram extraídas as áreas com médios e altos estados de degradação.

O MapBiomias é uma plataforma de dados espacializados aberta onde disponibiliza-se diversos estudos sobre o território brasileiro a partir de dados da coleção Landsat Tier 1 com resolução de 30 metros a partir da classificação pixel a pixel pelo classificador Random Forest. Segundo a plataforma, seu processamento é feito em nuvem, que é a tecnologia que permite armazenar, manter e acessar dados em servidores via internet, utilizando a plataforma Google Earth Engine (SOUZA et. al, 2020).

A análise da qualidade da pastagem utilizado pela plataforma usa o vigor vegetativo (NDVI) como indicador para separar as pastagens em 3 classes: degradação severa (NDVI < 0,4); degradação moderada (NDVI entre 0,4 e 0,5) e sem degradação (NDVI > 0,5) das áreas de pastagens já delimitadas em outras coleções de mapas da plataforma, e, através das análises das áreas de pastagem disponíveis no CAR, é feito o peso e criado o Índice de Degradação de Pastagem que é utilizado neste trabalho.

Segundo esse método utilizado pela plataforma, no ano de 2021 o Brasil possuía mais de 95 milhões de hectares de pastagem degradada, 33.188.538 hectares com degradação severa e 62.328.290 hectares de áreas de degradação moderada. Essas áreas de média e alta degradação estão representados na Figura 13 abaixo.



Fonte: Autor.

Esses dados foram utilizados sobrepostos aos dados especializados de adaptabilidade da macaúba das regiões utilizadas como as regiões de interesse no tópico 4.4 do primeiro capítulo. O resultado dessa sobreposição são áreas aptas ao cultivo da macaúba que atualmente são

ocupadas por pastagens com médio ou alto nível de degradação. Esse resultado foi utilizado como sendo o dado de entrada para o desenvolvimento do trabalho dentro da ferramenta do modelo InVEST para valoração do sequestro de carbono.

### 3.2.2. Estoque de Carbono das espécies selecionadas

Para suprir as informações referentes ao perfil de concentração de carbono nas culturas, os dados de uma pesquisa de alocação de carbono na macaúba realizada por Moreira et al. (2020) foi utilizado, onde foi quantificado o acúmulo de carbono na biomassa acima e abaixo do solo pela macaúba.

A partir da revisão de literatura estabeleceu-se também os valores de carbono estocado na espécie *Urochloa brizantha* cv. *marandu* mais conhecida como capim marandu representando a pastagem degradada. Utilizou-se essa espécie pois cerca de 80% das áreas de pastagens cultivadas no Brasil são ocupadas por genótipos de *Brachiaria*, com o capim-Marandu representando 50% deste total (CARDOSO et al., 2015). Para essa cultura foram utilizados os dados de estoque de carbono acima e abaixo do solo levantadas por Sanqueta et al. (2019).

Para o cálculo do sequestro de carbono pela mudança do uso do solo, o valor utilizado referente a concentração de carbono em pastagens degradadas foi retirado da literatura, que segundo Sanqueta et al (2009). Uma vez que o trabalho teve foco nas pastagens degradadas, foi utilizado um valor médio entre o menor valor de estoque de carbono das pastagens degradadas encontrado por Sanqueta e a média encontrada por ele de estoque de carbono de toda a cultura, assim podendo abranger áreas de média e alta degradação. O valor encontrado foi em torno de 5 Mg de carbono por hectare para a espécie utilizada. Vale ressaltar que a média de estoque de carbono de pastagens (considerando também áreas não degradadas) segundo o inventário brasileiro de emissões e remoções de gases do efeito estufa é de 7,5 Mg C ha<sup>-1</sup>.

Para a valoração econômica, esta variável precisa ser transformada para carbono equivalente, que é a variável utilizada para valorar o sequestro de carbono, corresponde ao valor de 18,33 Mg Ceq ha<sup>-1</sup>. O valor de carbono estocado para plantas da macaúba de 9 anos atinge a marca de 6,6 toneladas de carbono por hectare, o que corresponde a uma quantidade de acúmulo de carbono de 226,17 Mg Ceq ha<sup>-1</sup> como representado na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3. Estoque de carbono acima e abaixo do solo de duas diferentes espécies.

<b>Cobertura do solo</b>	<b>Carbono estocado (acima e abaixo do solo) Mg Ceq ha<sup>-1</sup></b>
Pastagem degradada	18,33
Cultivo de macaúba (9 anos)	226,17

Uma vez que o foco da pesquisa é o potencial de sequestro de carbono através da mudança de uma determinada espécie por outra, os dados de carbono na matéria morta e do carbono pertencente ao solo não foram utilizados, embora espera-se que a quantidade de carbono no solo aumente devido à melhoria do extrato do solo. Logo, foi considerado esses valores como 0 nas equações do modelo utilizado.

### **3.2.3. Dados econômicos para valoração**

O custo social do carbono (SCC), representado no trabalho como preço da tonelada de carbono, é uma forma de avaliação e quantificação dos danos e impactos econômicos e sociais futuros das emissões atuais dos gases de efeito estufa (RODE et al., 2021). Ele indica o quanto vale, atualmente, evitar o impacto que é projetado para o futuro das emissões de GEE's e serve como um parâmetro econômico para que agências federais incorporem o impacto ambiental ao analisar a viabilidade de projetos. Teoricamente, o custo social do carbono deveria aumentar com o passar do tempo, uma vez que a economia e o meio biótico seriam mais impactados com o avanço das mudanças climáticas (LIU et al., 2022).

As taxas de desconto, em geral, são múltiplos que valoram o sequestro de carbono através do tempo (RICHARD, 2009) Esses valores mudam de acordo com a mudança de perspectiva que temos sobre as ações atuais e futuras relacionadas a liberação de gases na atmosfera e quanto essas ações impactam na mitigação dos efeitos dos gases de efeito estufa (CORNELIS VAN KOOTEN et al., 2021).

A “Taxa de desconto anual de mercado do preço do carbono” reflete a preferência de benefícios imediatos a benefícios futuros e varia para diferentes tipos de paisagens e suas condições locais. Adelisardou (2022) utilizou um estudo do governo iraniano para adotar um

valor de 12% (IRANIAN STATISTICAL YEARBOOK, 2017). Em seu projeto, Manley e Maclaren (2012) utilizaram o valor para essa taxa de 8%. O governo dos EUA, durante o mandato de Barack Obama, utilizou uma taxa de desconto igual a 3% entre os anos de 2009 a 2017. Uma pesquisa feita em 2015 com 197 economistas teve sua maioria a favor de uma taxa de desconto entre 1 e 3 por cento (HWANG et al., 2021).

A "Taxa anual de mudança no preço de carbono" denota o valor do sequestro de carbono e seu resultado das emissões de carbono com o impacto associado à mudança climática esperada. O valor padrão para essa variável é zero. Um valor maior que zero significa que o custo social de carbono no futuro é menor que o valor atual.

O governo dos EUA utilizava os valores de custo social de carbono (SCS) de \$51/t CO<sub>2</sub> no período de 2009 a 2017 com uma taxa de desconto de 3% ao ano, valor esse que esteve na casa de \$8/t CO<sub>2</sub> e 7% no governo de Trump e que retornou aos patamares do governo de Obama com a eleição de Biden. O preço da tonelada de carbono no mercado regulado europeu, onde estão 90% das transações do mundo, foi o valor utilizado para esse estudo, utilizando como base o mês de setembro de 2021, data que foi levantado esse dado. Para esse momento, o valor de preço da tonelada de carbono era de €81,02 (<https://www.sendeco2.com/es/>). Para a taxa de desconto anual de mercado utilizou-se o valor de 3%, taxa de desconto utilizado pelo governo de Biden, os mesmos 3% em que se utilizou no governo de Barack Obama, já para a taxa de mudança anual no preço do carbono utilizou-se o valor de 0%. De posse desses dados, houve a inserção dos valores dentro do modelo InVEST para a valoração dos resultados.

Para o cálculo do sequestro e valoração ao longo do tempo, utilizou-se o ano inicial de 2020, que foi o ano de início do estudo e foi definido o ano de 2030 como sendo o ano final de avaliação por ser um dos anos emblemáticos dentro dos relatórios IPCC e pela macaúba estar já na fase adulta, momento esse que temos dados do seu estoque de carbono bem catalogado.

### **3.3. Processamento dos dados**

O modelo utiliza a equação, representada abaixo, para se calcular o valor sequestrado de carbono no tempo para uma determinada área. A partir desse dado pode ser realizada a valoração econômica através da relação com o custo social do carbono e as taxas de desconto adotadas.

$$Valor\ seqx = V \left( \frac{sx}{q-p} \right) \sum_{t=0}^{q-p-1} \frac{1}{\left( 1 + \left( \frac{tm}{100} \right)^t \left( 1 + \left( \frac{tv}{100} \right)^t \right) \right)}$$

sendo:

V= preço da tonelada de carbono

$s_x$  = quantidade de carbono sequestrada na parcela x, em toneladas

q = ano futuro

p = ano atual

$t_m$  = taxa anual de desconto do mercado de carbono

$t_v$  = taxa anual de desconto de mudança do valor do carbono

Neste cálculo é utilizada uma das fórmulas propostas pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CDM. UNFCCC, 2015), usada nos cálculos de crédito de carbono em projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo representada na equação abaixo:

$$\Delta Ct = (Ct2 - Ct1) / (t2 - t1)$$

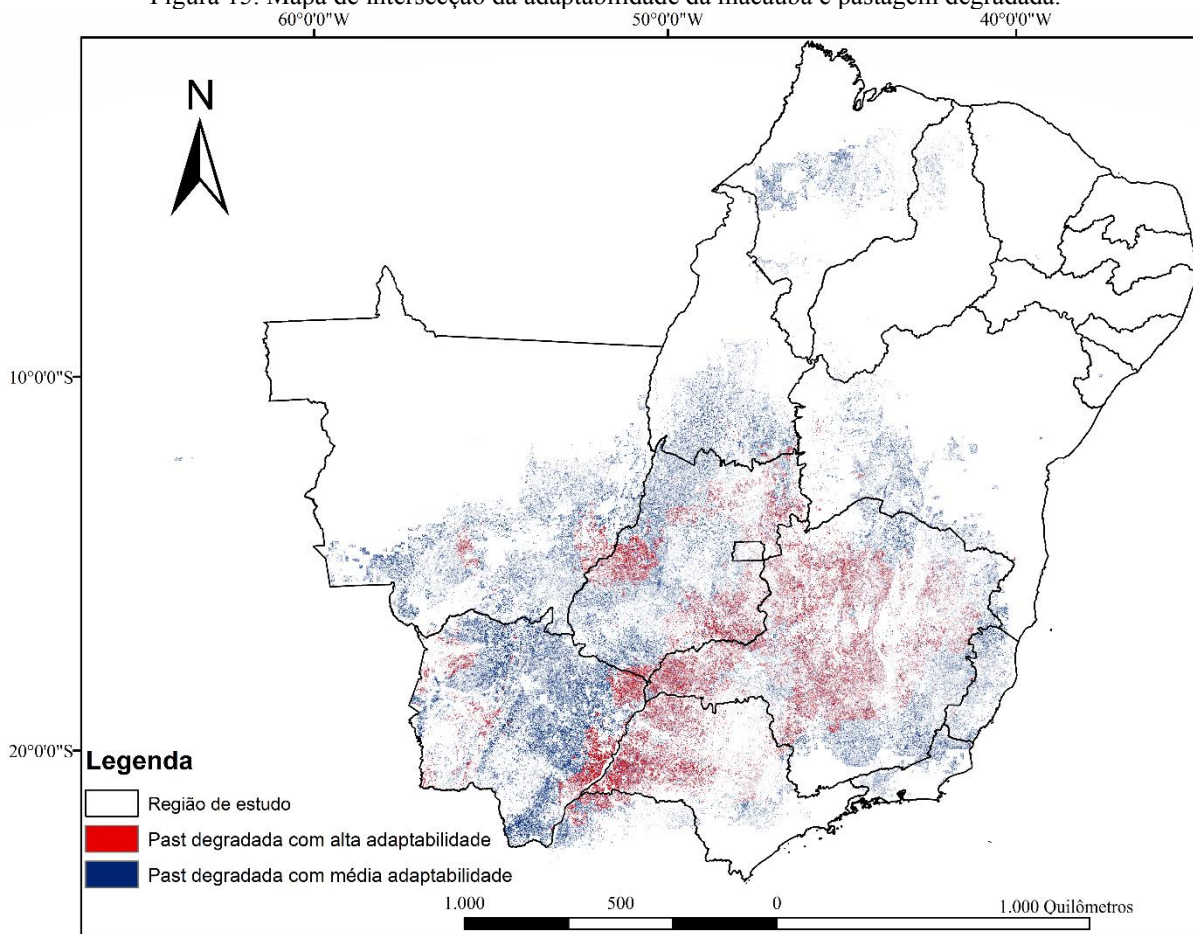
em que:  $\Delta Ct$  = mudança no estoque de carbono em uma célula s entre os tempos  $t_1$  e  $t_2$ ;  $Ct_2$ : estoque de carbono em árvores no tempo  $t_2$  (em toneladas de CO<sub>2</sub>e);  $Ct_1$ : estoque de carbono na célula no tempo  $t_1$  (t CO<sub>2</sub>e).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Intersecção dos mapas

Utilizando a Figura 12 que representa as áreas de pastagem degradada no Brasil e, ao se sobrepor com os dados espacializados de média e alta adaptabilidade do capítulo anterior, representado pela Figura 11, pôde-se obter se o mapa de intersecção entre áreas de pastagem degradada e as áreas de média e alta adaptabilidade do cultivo de macaúba representado pela Figura 15 abaixo.

Figura 15. Mapa de intersecção da adaptabilidade da macaúba e pastagem degradada.



Fonte: Autor.

Através do mapa de intersecção apresentado acima e utilizando um software de sistema de informação geográfica, como o ArcGIS, também foi possível estimar o valor das áreas de pastagem com média e alta degradação e que também apresentam uma adaptabilidade média e alta para o cultivo da macaúba. Esses valores chegam a aproximadamente 9 milhões de hectares para as áreas de alta adaptabilidade e 30 milhões de hectares para as áreas de média adaptabilidade. Isto quer dizer que atualmente há uma grande quantidade de áreas com alta capacidade de transformação de sítios improdutivos para sítios produtivos, além de auxiliar na captura do gás carbônico.

Para o resultado da quantificação econômica da substituição do plantio de macaúba nas áreas de pastagem degradada, utilizou-se o mesmo dado espacializado acima (Figura 15) como sendo o mapa representante das áreas atuais de uso do solo e considerou-se que essas áreas de pastagem degradada seriam totalmente transformadas em cultivo de macaúba, representando o mapa de uso futuro do solo na valoração do sequestro de carbono exercido pela macaúba dentro do modelo InVEST Carbon.

#### 4.2. Modelo InVEST

Ao utilizar o modelo InVEST, os dados de saída são dados espacializados que indicam, a partir da mudança do solo, quais são as áreas de maior sequestro de carbono e quais possuem um maior retorno econômico.

Neste trabalho, como foi realizado o estudo da mudança de apenas duas culturas, sendo uma a sucessão da outra na linha do tempo na mesma área, os mapas resultantes do modelo são iguais aos mapas de intercessão entre adaptabilidade da macaúba e áreas de pastagem degradadas, representado na Figura 15 acima, tendo como resultado os valores de sequestro de carbono e valoração do sequestro ao longo do tempo de estudo. Os resultados serão apresentados abaixo.

Ao executar o modelo, obteve-se como resultado que a substituição das áreas de pastagem degradada pelo investimento no cultivo da macaúba (considerando aqui os valores de estoque de carbono de um indivíduo de 9 anos) foi capaz de sequestrar uma quantidade de 207,84 Mg.Ceq ha<sup>-1</sup> dentro do período de estudo determinado, nesse trabalho, um período equivalente a 10 anos.

O resultado obtido mais importante, foi o de estimativa da valoração do sequestro de carbono através da substituição das áreas de pastagem de área degradada pelo cultivo da macaúba. O modelo indica que há uma possibilidade de ganhos de até €13.000 por hectare, aponta também que a estimativa da possibilidade de ganho total no Brasil ao se levar em consideração a quantidade de áreas aptas de pastagem e a valoração de ganho econômico feito pelo modelo pode chegar a valores superiores a €117 bilhões e €390 bilhões considerando as áreas de alta e média adaptabilidade, respectivamente, como representado na tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Retorno econômico previsto com a mudança de cultura.

Áreas aptas para plantio (em milhões de hectares)	Possibilidade de retorno econômico (em bilhões de euros)
9	117
30	390

Hwang et al. (2021), utilizaram o modelo InVEST Carbon para quantificar a mudança no estoque de carbono na vegetação acima e abaixo do solo além da quantidade de carbono na matéria morta e no próprio solo ao longo de um intervalo de 13 anos em uma região metropolitana de Seoul e usaram os resultados para alertar sobre a problemática das expansões urbanas desenfreadas.

Chu et al. (2019) verificaram em um estudo de 1990-2015 que a quantidade de carbono sequestrado havia diminuído na região de estudo do projeto ao longo do tempo, e afirmou sobre o retorno econômico positivo que ocorreria nas áreas de reflorestamento do Three-North Shelterbelt Program (TNSP), um programa grande de reflorestamento, mostrando que com um investimento baixo pode-se atingir grandes quantidades de carbono sequestrado.

Utilizando o modelo InVEST, Maanan (2019) modelou os impactos da mudança de uso e cobertura do solo em uma região de 50 km<sup>2</sup> no nordeste do Marrocos e, avaliando o resultado das mudanças do uso do solo e dos serviços ecossistêmicos prestados, estimou que os serviços por sequestro de carbono poderiam ser estimados entre 1,8 bilhões e 3,57 bilhões de dólares para um período de 21 anos (1996-2017), com um incremento médio anual entre 86 mil e 170 mil dólares. Além dos resultados, mostrou que a gestão do ecossistema tem tido impacto na mitigação dos efeitos climáticos.

Sil e Fonseca (2017) utilizaram o modelo InVEST Carbon como parte de um trabalho onde avaliou-se o impacto do sequestro de carbono nas esferas socioeconômicas e nas mudanças climáticas. Os resultados se mostraram essenciais para o planejamento da expansão urbana e no entendimento em como as mudanças da paisagem podem afetar o provisionamento do serviço ecossistêmico de regulação climática. Para a análise feita de 1990 a 2006 o custo evitado devido ao sequestro de carbono estava entre 10 e 150 milhões de dólares, e apontou que caso a região possa continuasse a ser preservada poderia-se ter um retorno de 23 a 313 dólares por hectare por ano resultando em um retorno de até 287 milhões para os próximos anos.

Adelisardou (2022) mostrou em um estudo realizado em uma região do Irã, que caso a tendência histórica permanecesse seguindo o cenário de BAU (business as usual), considerando mudanças rápidas no uso da terra causadas pelas atividades humanas entre 2019 e 2046, o resultado seria um custo social de perda de estoque de carbono de 2.624.113 Mg de carbono, um retorno anual de -475.547 Mg, ou seja, acarretaria na liberação dessa quantidade de carbono para a atmosfera. Adotado no trabalho o valor da tonelada de carbono emitida equivalente a

\$110 e uma taxa de 12% como a taxa de desconto, o custo do dano nas próximas duas décadas atingiria o valor de 36 milhões de dólares, enquanto que, caso fosse adotado um plano de recuperação da área o estudo mostrou que o valor seria um retorno positivo de 45 milhões de dólares.

Segundo um estudo feito por Moreira et al. (2020), um plantio de macaúba de no mínimo 560 hectares distribuídos em um espaçamento de 5x5 metros seria capaz de sequestrar 16.088 Mg eq.ha.ano. Além disso a macaúba pode ser cultivada junto com outras culturas e utilizada como ferramenta para projetos para recuperação de áreas degradadas e sistemas agroflorestais, possibilitando de trazer mais ganhos para o agricultor (MOREIRA et al., 2019).

O Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC) (BRASIL, 2015). também tem como meta aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para 18% até 2030, fortalecendo o consumo de biocombustíveis e aumentando a porcentagem de biodiesel na mistura de diesel. Cerca de 200.000 hectares de plantação de macaúba em sistema silvipastoril são necessários para zerar as importações de óleo de palma do Brasil (SALOMÃO; ZIMPEL, 2020).

Em 2019, a adição de biodiesel ao diesel evitou a emissão de 16,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (EPE, 2020). Estima-se que em 2030 a demanda por biodiesel salte de 6,8 milhões de litros (2020) para 11,5 milhões, valor calculado pelo Plano Decenal de Expansão de Energia para atender o Programa Nacional de Biocombustíveis. Esta mesma necessidade poderia ser atendida com uma área de 2 milhões de hectares, caso estivéssemos falando do cultivo da macaúba, uma diminuição de área de 81,8% em relação ao que seria necessário caso estivéssemos falando do óleo de soja (EPE, 2020).

## **5. CONCLUSÕES**

O trabalho evidenciou a grande quantidade de áreas de pastagem com algum tipo de degradação dentro do território brasileiro, com destaque para as regiões Sudeste e Centro-Oeste. No ano de 2021 o Brasil possuía mais de 95 milhões de hectares de pastagem degradada, 33.188.538 hectares com degradação severa e 62.328.290 hectares de áreas de degradação moderada.

Os valores encontrados de área de pastagem degradada com adaptabilidade alta e média/alta para o cultivo da macaúba no Brasil, encontrado através da sobreposição dos mapas de áreas degradadas e regiões aptas para o cultivo da macaúba, chegam a 9 e 30 milhões de hectares respectivamente. A troca integral de diesel fóssil por renovável em 2030 poderia ser suprida por 26 milhões de hectares.

A macaúba possui um potencial considerável na retenção de carbono e ao se substituir áreas de pastagem degradadas pelo cultivo da macaúba pode-se gerar um grande retorno econômico. O potencial para o sequestro de carbono é destacável quando comparado a áreas de cultivo de outras espécies, sendo capaz de sequestrar mais de 200 Mg.C ha<sup>-1</sup> quando comparado a um cultivo de pastagem degradada e avaliado o período de desenvolvimento da macaúba até a sua fase adulta.

A utilização do modelo InVEST permitiu valorar economicamente o retorno da mudança da cobertura do uso do solo de uma pastagem degradada para o cultivo da macaúba e estimou que os ganhos relacionados a essa substituição podem oferecer até 13 mil euros por hectare, e que em escala de Brasil esse valor pode chegar a quase 400 bilhões de euros, o que equivale a mais de 2 trilhões de reais na cotação atual.

Por poder contribuir com a recuperação de áreas degradadas e melhorar serviços ecossistêmicos prestados na região, ao mesmo tempo em que possui o potencial de suprir diversas indústrias e aumentar a resiliência do produtor, deve-se avaliar ações para incentivar a produção e consolidar as cadeias de produção que utilizam a macaúba dentro do território brasileiro.

## 6. REFERÊNCIAS

ADELISARDOU, F., ZHAO, W., CHOW, R. et al. Spatiotemporal change detection of carbon storage and sequestration in an arid ecosystem by integrating Google Earth Engine and InVEST (the Jiroft plain, Iran). *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 5929–5944. 2022. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03676-6>

BOTTALICO, F. et al. Modeling the influence of alternative forest management scenarios on wood production and carbon storage: A case study in the Mediterranean region. *Environmental Research*, v. 144, p. 72–87, 2016.

BRAZIL. Intended Nationally Determined Contribution: Towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change. **Intended Nationally Determined Contribution**, v.9, p. 6, (INDC).2015.

<http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20NDC%20english%20FINAL.pdf>

CARDOSO, J. et al. Fontes e doses de nitrogênio na produtividade do capim-Marandu. **PubVet**, v. 9, n. 8, p. 348–358, 2015.

CHAPLIN-KRAMER, R. et al. Spatial patterns of agricultural expansion determine impacts on biodiversity and carbon storage. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 24, p. 7402–7407, 2015.

CHU, X. et al. Assessment on forest carbon sequestration in the Three-North Shelterbelt Program region, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 382–389, 2019.

COSTANZA, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, n. 1, p. 152–158, 2014.

DAILY, G. C. et al. Ecosystem services in decision making: Time to deliver. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 7, n. 1, p. 21–28, 2009.

DE GROOT, R. et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. **Ecosystem Services**, v. 1, n. 1, p. 50–61, 2012.

EHRHART, C. et al. **Climate, community and biodiversity : Project design standards**. [s.l: s.n.].2008.

FADAEI, E.; MIRSANJARI, M. M.; AMIRI, M. J. Modeling of Ecosystem Services based on Land Cover Change and Land Use Using InVEST Software in Jahannama Conservation Area (Case : Carbon Sequestration Ecosystem Service ) یبراک و ششوپ تارییغت رب ینتیم یمتسیسوکا InVE. **Town & Country Planning**, v. 12, n. 1, p. 1–22, 2020.

HE, F., JIN, J., ZHANG, H. et al. The change of ecological service value and the promotion mode of ecological function in mountain development using InVEST model. **Arab J Geosci** 14, 510 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06869-y>.

HE, C. et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. **Environmental Modelling and Software**, v. 75, p. 44–58, 2016.

HWANG, J. et al. Analysis of Land Use Changes and Carbon Storage by Region under the Seoul Metropolitan Area Readjustment Planning Act Using the InVEST Carbon Model. **Journal of Climate Change Research**, v. 12, n. 5–1, p. 523–535, 2021.

INOCAS. **Carbon Sequestrations of INOCAS Macaúba Plantations in Brasil**. [s.l: s.n.]. 2020.

LIU, Z. et al. Monitoring global carbon emissions in 2021. **Nature Reviews | Earth & Environment**, v. 3, p. 217–219, 2022.

MAANAN, M. et al. Modelling the potential impacts of land use/cover change on terrestrial carbon stocks in north-west Morocco. **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 26, n. 6, p. 560–570, 2019.

MAC DOWELL, N. et al. The role of CO<sub>2</sub> capture and utilization in mitigating climate change. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 4, p. 243–249, 2017

MACEDO, M. C. M. ; et al. Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. **Encontro de adubação de pastagens da Scot Consultoria - Tec - Fértil.**, p. 158–181, 2014.

MACEDO, M. C. M.; KICHEL, A. N.; ZIMMER, A. H. **Degradação e alternativas de recuperação e renovação de pastagens**. Campo Grande: EMBRAPACNPGC. 4 p. (Comunicado Técnico, 62), 2000.

MANLEY, B.; MACLAREN, P. Potential impact of carbon trading on forest management in New Zealand. **Forest Policy and Economics**, v. 24, p. 35–40, 2012

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesi**. Washington, DC: [s.n.]. 2005.

MOREIRA, S. L. S. et al. Root distribution of cultivated macauba trees. **Industrial Crops and Products**, v. 137, n. May, p. 646–651, 2019

MOREIRA, S. L. S. et al. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020.

NELSON, E. et al. Projecting Global Land-Use Change and Its Effect on Ecosystem Service Provision and Biodiversity with Simple Models. v. 5, n. 12, 2010.

NINAN, K. N.; KONTOLEON, A. Valuing forest ecosystem services and disservices - Case study of a protected area in India. **Ecosystem Services**, v. 20, p. 1–14, 2016.

OECD-FAO Agricultural Outlook 2017-2026, OECD Publishing, Paris. (2017). [http://dx.doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2017-en](http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-en). [http://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2017-2026\\_agr\\_outlook-2017-en](http://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2017-2026_agr_outlook-2017-en).

OLIVEIRA, G. F. et al. Quantile regression in genomic selection for oligogenic traits in autogamous plants: A simulation study. **PLoS ONE**, v. 16, n. 1 January, p. 1–12, 2021.

PAUSTIAN, K. et al. Agricultural soils as a sink to mitigate CO<sub>2</sub> emissions. **Soil Use and Management**, v. 13, n. 4 SUPPL., p. 230–244, 1997.

PERON, A. J.; EVANGELISTA, A. R. DEGRADAÇÃO DE PASTAGENS EM REGIÕES DE CERRADO Pasture degradation in savanna's regions. **Ciência agrotecnica**, v. 28, n. 3, p. 655–661, 2003.

RICHARD S. J. TOL. The Economic Effects of Climate. **The Journal of Economic Perspectives Journal of Economic Perspectives**, v. 23, n. 2, p. 29–51, 2009.

RODE, A. et al. Estimating a social cost of carbon for global energy consumption. **Nature**, v. 598, n. 7880, p. 308–314, 2021.

SALOMÃO, V. F. F., & ZIMPEL, J. Projeto Macaúba-Introdução de sistema silvipastoril inovador no cerrado brasileiro para a produção de óleos vegetais sustentáveis. (2020). <https://biblioguias.cepal.org/bigpushparaasustentabilidade>.

SANQUETTA, C. R. et al. Estoque De Biomassa E Carbono Em Pastagens Cultivadas No Norte De Rondônia. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 102, 2019.

SIL, Â. et al. Analysing carbon sequestration and storage dynamics in a changing mountain landscape in Portugal: Insights for management and planning. **International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management**, v. 13, n. 2, p. 82–104, 2017.

SOUZA et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, 12(17). (2020). <https://doi.org/10.3390/RS12172735>.

TILMAN et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature** 418, 671–677 (2002). <https://doi.org/10.1038/nature01014>.

VAN KOOTEN, G. C. The Challenge of Mitigating Climate Change through Forestry Activities: What Are the Rules of the Game? **Ecological Economics**, v. 146, n. September 2017, p. 35–43, 2018.

YANG, Y. et al. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1–7, 2019.

XU et al. Modelling land system evolution and dynamics of terrestrial carbon stocks in the Luanhe River Basin, China: a scenario analysis of trade-offs and synergies between sustainable development goals. **Sustain Science** 17, 1323–1345 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11625-021-01004-y>.

### III. CONCLUSÕES GERAIS

A primeira parte do trabalho realizado serviu para identificar as condições de clima e solo que influenciam na distribuição espacial e sobrevivência da Macaúba nas diferentes regiões do Brasil, pois é fundamental para que se tenha uma cadeia produtiva sólida e sustentável a longo prazo. Verificou-se, através dos resultados a concentração de áreas mais aptas a sobrevivência da macaúba nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, sendo que um total de mais de 200 milhões de hectares foram apresentadas como áreas aptas ao cultivo da macaúba e sua sobrevivência.

A partir dessas informações, produtores rurais e empresas do agronegócio interessados no cultivo da macaúba podem investir com maior segurança, reduzindo perdas de produtividade causadas por fatores ambientais e optando por áreas com maior probabilidade de sucesso na sobrevivência da espécie. Além disso, em um cenário de mudanças climáticas, conhecer o comportamento ecofisiológico da macaúba será cada vez mais importante para que se tenha êxito no seu cultivo.

O trabalho também abordou sobre a quantidade de áreas degradadas no Brasil, com destaque para as regiões Sudeste e Centro-Oeste, totalizando mais de 95 milhões de hectares. Essas áreas possuem um grande potencial de se tornarem novamente fontes de serviços ecossistêmicos quando pensamos na recuperação dessas áreas através da introdução de novos cultivos, como apresentado no trabalho através do uso da macaúba. A demanda por energias mais limpas é um grande impulsionador do cultivo da macaúba e possui um grande impacto na diminuição da emissão dos gases de efeito estufa quando pensamos no potencial da macaúba como um sequestrador de gás carbônico, em comparação com alguns tipos de pastagem degradadas, a macaúba pode chegar a sequestrar valores próximo de 205 Mg.C ha<sup>-1</sup>.

Os resultados sugerem que a proposta da segunda parte do projeto em substituir as áreas degradadas pelo cultivo da macaúba representa uma estratégia de destaque com diversos impactos tanto na cadeia produtiva, produção de alimentos, mas também como um aliado no combate a emissão de gases do efeito estufa. Há uma grande quantidade atualmente no Brasil que demonstram ter essa adaptabilidade para esse fim. Ao se levar em conta o mercado de carbono, essa mudança poderia gerar uma elevada quantidade de créditos de carbono que poderiam ser vendidos podendo se tornar uma fonte de renda para o agricultor/investidor.

Ao se valorar economicamente o retorno da mudança da cobertura do uso do solo de uma pastagem degradada para o cultivo da macaúba, o modelo InVEST utilizado nesse trabalho estimou que os ganhos relacionados a essa substituição podem chegar até 13 mil euros por hectare, e que quando comparados a quantidade de áreas degradadas no Brasil que apresentam adaptabilidade para a macaúba, esse valor pode chegar a quase 400 bilhões de euros.

Logo, este projeto busca reforçar os ganhos possíveis advindos do cultivo da macaúba em áreas já utilizadas e não a abertura de novas áreas, respeitando o meio ambiente e reabilitando-o, com uma grande possibilidade de retorno através do sequestro de carbono e produção de matérias primas com foco no biodiesel.