



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E
AMBIENTAIS

MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICO PARA CONSERVAÇÃO E USO
SUSTENTÁVEL DE ESPÉCIES DO GÊNERO *Paullinia* EM CENÁRIOS DE MUDANÇA
CLIMÁTICA

SANDRA DE OLIVEIRA AMARAL

MANAUS - AM
2025

SANDRA DE OLIVEIRA AMARAL

MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICO PARA CONSERVAÇÃO E USO
SUSTENTÁVEL DE ESPÉCIES DO GÊNERO *Paullinia* EM CENÁRIOS DE MUDANÇA
CLIMÁTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais.

Orientadora: Profa. Dra. Angela Maria da Silva Mendes

Coorientadora: Dra. Jennifer Souza Tomaz

Coorientadora: Profa. Dra. Caroline de Souza Bezerra

MANAUS - AM
2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A485m Amaral, Sandra de Oliveira
Modelagem de nicho ecológico para conservação e uso sustentável de espécies do gênero *Paullinia* em cenários de mudança climática / Sandra de Oliveira Amaral. - 2025.
49 f. : il., p&b. ; 31 cm.

Orientador(a): Ângela Maria da Silva Mendes.
Coorientador(a): Jennifer Souza Tomaz.
Coorientador(a): Caroline de Souza Bezerra.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Manaus, 2025.

1. Biodiversidade. 2. Adaptação Ecológica. 3. Serviços Ecossistêmicos.
4. Mudanças Climáticas. I. Mendes, Ângela Maria da Silva. II. Tomaz, Jennifer Souza. III. Bezerra, Caroline de Souza. IV. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais. V. Título

SANDRA DE OLIVEIRA AMARAL

MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS PARA CONSERVAÇÃO E USO
SUSTENTÁVEL DE ESPÉCIES DO GÊNERO *Paullinia* EM CENÁRIOS DE MUDANÇA
CLIMÁTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais.

Aprovado em: 20 de março de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Angela maria da Silva mendes
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Santiago Linório Ferreyra Ramos
Universidade Federal do Amazonas

Profa. Dra. Maria José Marques
Universidade Federal do Amazonas

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me proporcionar saúde, força e paz para seguir em busca dos meus objetivos.

Expresso minha gratidão aos meus pais, que não estão mais presentes nesta vida, mas que se empenharam para que tivéssemos a oportunidade de estudar, foram exemplos de superação e perseverança.

Às minhas irmãs que sempre me apoiaram e incentivaram, em especial Beatriz, Adriene e Silvia, figuras muito importantes em minha jornada e ao meu irmão, deixo minha gratidão.

Ao meu companheiro, Jeremias, que sempre esteve comigo nos momentos mais delicados de minha vida, ajudando-me a reerguer e seguir em frente.

Aos meus filhos, pelo apoio e carinho, Nicolas Joaquim, Gustavo, Jhonatan, Marcos Vinicius, e meus demais familiares, que também foram figuras importantes nessa trajetória.

Agradeço a minha orientadora, Dra. Angela Maria da Silva Mendes, pelo conhecimento transmitido, pela dedicação e pela disponibilidade.

Às minhas coorientadoras Dra. Caroline de Souza Bezerra e Dra. Jennifer Souza Tomaz, que foram imprescindíveis para a realização do projeto, minha gratidão.

Aos colaboradores da pesquisa, membros do Laboratório de Genética e Melhoramento Vegetal da Universidade Federal do Amazonas.

À Dra. Maria Tereza Gomes Lopes, pelo apoio ao projeto de pesquisa e incentivo.

À CAPES pelo apoio financeiro e pelos incentivos que tornaram possíveis a consolidação desta pesquisa.

Aos professores e colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais - PPGCIFA.

Agradeço as amigas que a UFAM me proporcionou, Hiêza, Wellem, Daiane, Sâmela, e a minha sobrinha Giovanna.

Por fim, agradeço de coração a todos vocês. Suas palavras e ajuda foram essenciais para o meu crescimento, e sou imensamente grata por ter contado com o apoio e a dedicação de cada um.

RESUMO

A biodiversidade global está sob crescente ameaça devido às mudanças climáticas e atividades antropogênicas, como desmatamento e agricultura intensiva. Nesse contexto, o presente estudo analisa o nicho ecológico de quatro espécies do gênero *Paullinia*: *Paullinia alata*, *Paullinia cupana* (guaranazeiro), *Paullinia pinnata* e *Paullinia weinmanniifolia* com foco em sua distribuição atual e futura sob cenários climáticos projetados. Dados georreferenciados foram obtidos de bancos de dados e herbários virtuais, processados para evitar viés amostral e combinados com 33 variáveis ambientais, incluindo características bioclimáticas e edáficas, para construção de modelos preditivos de alta qualidade. Os resultados indicaram diferenças significativas na adaptabilidade das espécies aos cenários climáticos. *P. alata* e *P. cupana* mostraram maior capacidade de persistência, com áreas adequadas predominando no domínio amazônico e potencial expansão para o Cerrado e a Caatinga. Por outro lado, *P. pinnata* e *P. weinmanniifolia* apresentaram maior sensibilidade às mudanças climáticas, com perdas significativas de habitats adequados, especialmente em cenários mais pessimistas. As variáveis climáticas relacionadas à temperatura e precipitação foram as que mais influenciaram a distribuição das espécies. A modelagem revelou a importância de refúgios climáticos, como a Amazônia e parte do Cerrado, para a preservação da diversidade genética e a mitigação de impactos climáticos. O estudo reforça a necessidade de ações integradas que incluam o manejo sustentável, o desenvolvimento de sistemas agroflorestais e o incentivo a políticas públicas que protejam os habitats naturais e promovam práticas agrícolas resilientes. Essas estratégias são essenciais para garantir a sustentabilidade ecológica e socioeconômica das comunidades que dependem dessas espécies.

Palavras-chave: biodiversidade, adaptação ecológica, serviços ecossistêmicos, mudanças climáticas.

ABSTRACT

Global biodiversity is under increasing threat due to climate change and anthropogenic activities such as deforestation and intensive agriculture. In this context, the present study analyzes the ecological niche of four species of the genus *Paullinia*: *Paullinia alata*, *Paullinia cupana* (guaranazeiro), *Paullinia pinnata* and *Paullinia weinmanniifolia* focusing on their current and future distribution under projected climate scenarios. Georeferenced data were obtained from databases and virtual herbaria, processed to avoid sampling bias and combined with 33 environmental variables, including bioclimatic and edaphic characteristics, for the construction of predictive models of high quality. The results indicated significant differences in the adaptation of species to climate scenarios. *P. alata* and *P. cupana* showed greater persistence capacity, with adequate areas predominating in the Amazon domain and potential expansion to the Cerrado and Caatinga. On the other hand, *P. pinnata* and *P. weinmanniifolia* showed greater sensitivity to climate change, with significant loss of suitable habitats, especially in more pessimistic scenarios. The climatic variables related to temperature and precipitation were those that most influenced the distribution of species. The modeling revealed the importance of climatic refuges, such as the Amazon and part of the Cerrado, for the preservation of genetic diversity and the mitigation of climate impacts. The study reinforces the need for integrated actions that include sustainable management, the development of agroforestry systems and the encouragement of public policies that protect natural habitats and promote resilient agricultural practices. These strategies are essential to ensure the ecological and socioeconomic sustainability of the communities that depend on these species.

Keywords: biodiversity, ecological adaptation, ecosystem services, climate change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pontos de ocorrência de a) <i>Paullinia alata</i> , b) <i>Paullinia cupana</i> , c) <i>Paullinia pinnata</i> e d) <i>Paullinia weinmanniifolia</i> na América do Sul, após a redução espacial.....	27
Figura 2. Projeção referente ao período presente (2009-2019) para as espécies a) <i>Paullinia alata</i> , b) <i>Paullinia cupana</i> , c) <i>Paullinia pinnata</i> e d) <i>Paullinia weinmanniifolia</i> na América do Sul.....	28
Figura 3. Projeção da adequabilidade ambiental de <i>Paullinia alata</i> e <i>Paullinia cupana</i> , no cenário climático menos pessimista SSP2-4.5 (a, b, c), (g, h, i) mais pessimista SSP5-8.5 (d, e, f), (j, k, l) nos intervalos de tempo 2041-2060 (a, d), (g, j), 2061-2080 (b, e), (h, k) e 2081-2100 (c, f), (i, l), respectivamente.....	29
Figura 4. Projeção da adequabilidade ambiental de <i>Paullinia pinnata</i> e <i>Paullinia weinmanniifolia</i> , no cenário climático menos pessimista SSP2-4.5 (a, b, c), (g, h, i) mais pessimista SSP5-8.5 (d, e, f), (j, k, l) nos intervalos de tempo 2041-2060 (a, d), (g, j), 2061-2080 (b, e), (h, k) e 2081-2100 (c, f), (i, l), respectivamente.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variáveis bioclimáticas (BIO), utilizadas na modelagem da predição de ocorrência das espécies do gênero <i>Paullinia</i>	23
Tabela 2. Variáveis de qualidade do solo, utilizadas na modelagem da predição de ocorrência das espécies do gênero <i>Paullinia</i>	24
Tabela 3. Valores de autovetores dos seis componentes principais (PC) das variáveis bioclimáticas e edáficas utilizados no processo de modelagem de nicho ecológico das espécies de guaraná.....	31
Tabela 4. Variáveis indicadoras e desvio padrão (DP) para validação de seis modelos para a predição da área potencial de ocorrência das espécies de espécies <i>Paullinia alata</i> , <i>Paullinia cupana</i> , <i>Paullinia pinnata</i> e <i>Paullinia weinmanniifolia</i>	33
Tabela 5. Projeções de acréscimo (+) ou perda (-) de área de adequabilidade ambiental (%) nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 nos intervalos de tempo 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100, em comparação com o período atual (km ²) na América do Sul, para as espécies <i>Paullinia alata</i> , <i>Paullinia cupana</i> , <i>Paullinia pinnata</i> e <i>Paullinia weinmanniifolia</i>	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Gênero <i>Paullinia</i>	14
3.2 <i>Paullinia alata</i> (Ruiz & Pav.) Don.....	15
3.3 <i>Paullinia cupana</i> Kunth	15
3.4 <i>Paullinia pinnata</i> L.....	17
3.5 <i>Paullinia weinmanniifolia</i> Mart.....	18
3.6 Desmatamento na Amazônia e Mudança climática	19
3.7 Conservação das espécies e Modelagem de nicho ecológico	20
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5. CONCLUSÃO.....	39
6. REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

A preservação da biodiversidade global tem se tornado uma preocupação crescente entre pesquisadores, devido às severas ameaças impostas pelas rápidas mudanças climáticas, intensificadas por atividades humanas como o desmatamento, a queima de combustíveis fósseis e a expansão da agricultura intensiva (Shivanna, 2022; Jha e Dev, 2024). Entre as principais consequências estão o aumento da temperatura média global, alterações nos regimes de precipitação e maior frequência de eventos climáticos extremos. Esses fenômenos impactam diretamente a manutenção dos serviços ecossistêmicos terrestres e aquáticos, que são fundamentais para a sobrevivência e o bem-estar da humanidade (Tan *et al.*, 2023; Dao *et al.*, 2024).

Essas alterações climáticas modificam a distribuição de habitats e os regimes climáticos, forçando as espécies vegetais a se adaptarem, migrarem ou enfrentarem o risco de extinção. Nesse contexto, compreender o comportamento dessas espécies é essencial para o planejamento de ações de conservação e manejo sustentável (Allen *et al.*, 2024). A predição de nicho ecológico é uma ferramenta essencial para compreender as possíveis respostas dessas espécies às mudanças climáticas, além de servir como base para o desenvolvimento de estratégias de conservação eficazes (Lawlor *et al.*, 2024).

A modelagem de nicho ecológico é fundamental para prever a distribuição de espécies vegetais sob diferentes cenários ambientais futuros em um contexto de mudanças climáticas (Carrillo-García *et al.*, 2023). E possui aplicações práticas importantes, como a identificação de refúgios climáticos, áreas potenciais para conservação e regiões de potencial perda de habitat, possibilitando análises detalhadas sobre vulnerabilidades e adaptação (Barratt *et al.*, 2024). Além disso, fornece subsídios para o planejamento de Unidades de Conservação e ações de restauração ecológica, especialmente em regiões mais sensíveis às mudanças climáticas, como a Mata Atlântica e a Amazônia (Leão *et al.*, 2021; Cordeiro *et al.*, 2023; Marques *et al.*, 2024).

Um dos gêneros botânicos de destaque em estudos de ecologia é o gênero *Paullinia*, pertencente à família das Sapindaceae, que compreende cerca de 200 espécies e encontra-se distribuído nas regiões tropicais da América, com destaque no Brasil para a Amazônia e a Mata Atlântica (Yamaguchi e Souza, 2020; Marinho *et al.*, 2024). Uma das espécies mais importantes deste gênero é *Paullinia cupana* Kunth, popularmente conhecida como “guaraná” e amplamente cultivada no Brasil, principalmente na região Norte, devido a importância econômica, social e ecológica que apresenta (Silva *et al.*, 2024).

O guaranazeiro é amplamente valorizado por suas propriedades medicinais e energéticas, atribuídas aos altos níveis de cafeína, taninos e outras substâncias bioativas presentes em suas sementes, que são utilizadas na fabricação de bebidas energéticas, medicamentos e suplementos alimentares, consolidando a espécie como um importante produto de exportação (Torres *et al.*, 2022). O guaranazeiro desempenha um papel crucial tanto na economia de comunidades tradicionais quanto na indústria global de alimentos e bebidas. Além de sua relevância econômica, exerce uma função vital na dinâmica dos ecossistemas florestais, servindo como fonte de alimento e abrigo para a fauna local, contribuindo significativamente com a biodiversidade e com a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais ao equilíbrio ambiental (Sousa *et al.*, 2024).

Contudo, o cultivo e a sobrevivência de *P. cupana* e outras espécies do gênero, podem ser ameaçados pelas mudanças climáticas, que alteram as condições ambientais necessárias para o crescimento e reprodução dessas plantas. Dada sua importância ecológica, econômica e social, o gênero tem sido foco de pesquisas voltadas à conservação e ao manejo sustentável (Araújo *et al.*, 2024). Nesse contexto, o uso de ferramentas de modelagem de nicho ecológico, combinado aos cenários climáticos projetados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), possibilita não apenas prever impactos negativos potenciais, mas também identificar áreas prioritárias para ações de conservação e estratégias de desenvolvimento sustentável (Schoeman *et al.*, 2023).

Estudos sobre a distribuição de espécies do gênero *Paullinia* possuem relevância científica e prática, auxiliando na formulação de políticas públicas e no manejo sustentável, além de promover o cultivo resiliente e preservar os serviços ecossistêmicos associados. Sob uma perspectiva socioeconômica, identificar áreas vulneráveis e desenvolver estratégias de adaptação às mudanças climáticas permite antecipar impactos nas comunidades que dependem do guaranazeiro.

Este estudo tem como objetivo analisar o nicho ecológico de *Paullinia alata* (Ruiz & Pav.) Don, *Paullinia cupana* Kunth, *Paullinia pinnata* L. e *Paullinia weinmanniifolia* Mart., destacando métodos de modelagem, cenários climáticos e impactos previstos, com o objetivo de contribuir para sua conservação e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas associados.

2. OBJETIVOS

2.2. Objetivo Geral

Modelar a distribuição atual e futura de *Paullinia alata* (Ruiz & Pav.) Don, *Paullinia cupana* Kunth, *Paullinia pinnata* L. e *Paullinia weinmanniifolia* Mart., utilizando variáveis edáficas e climáticas a fim de prever mudanças na distribuição geográfica dessas espécies devido às mudanças climáticas globais.

2.3. Objetivos Específicos

- Identificar as variáveis ambientais que influenciam a distribuição atual e futura das espécies do gênero *Paullinia*;
- Desenvolver modelos de distribuição potencial das espécies do gênero *Paullinia* utilizando técnicas de modelagem espacial e ambiental;
- Analisar como a mudança climática projetada podem afetar a distribuição futura das do gênero *Paullinia* na Amazônia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Gênero *Paullinia*

O gênero *Paullinia* pertence à família Sapindaceae, e é caracterizado como um grupo monofilético de lianas, amplamente distribuído nas regiões tropicais e subtropicais, com elevado endemismo nas florestas Amazônica e Atlântica. Ele compreende aproximadamente 220 espécies, das quais, 102 ocorrem no Brasil, principalmente nos domínios fitogeográficos da Mata Atlântica e Amazônia, em ambientes úmidos e com alta incidência de luz solar (Chery *et al.*, 2019; Somner & Medeiros, 2020; Pimentel *et al.*, 2023). Muitas delas são lianas ou trepadeiras lenhosas com papel ecológico importante em bordas e dosséis de florestas úmidas, atuando como fonte de frutos e néctar para a fauna e compondo a estrutura vertical da floresta (Marinho *et al.*, 2025).

Do ponto de vista morfológico e palinológico, o gênero apresenta características úteis para separar espécies próximas, como o tipo de inflorescência, forma e tricomas das folhas, além de padrões de grãos de pólen. Estudos recentes mostraram que espécies neotropicais de *Paullinia* exibem diferenças consistentes na ornamentação do exina e no tamanho dos grãos, o que fortalece diagnósticos em grupos com morfologia vegetativa semelhante (Marinho *et al.*, 2025).

Além da relevância florística, o gênero *Paullinia* possui expressivo valor etnobotânico e econômico. Espécies como *P. cupana* (guaranazeiro) sustentam cadeias produtivas regionais, enquanto outras são amplamente mencionadas em estudos sobre uso tradicional, fitoterapia e bioprospecção, sobretudo na Amazônia e no arco andino-amazônico (Congretel & Pinton, 2020). Diversas espécies de *Paullinia* apresentam usos reconhecidos na etnofarmacologia, empregadas como psicotrópicos, bactericidas, antioxidantes, ictiotóxicos, estimulantes e em práticas ritualísticas (Beck, 1990; Basile *et al.*, 2005; Pimentel *et al.*, 2023). Estudos prévios também indicam que as plantas do gênero são utilizadas tanto na forma fresca quanto em preparações elaboradas, demonstrando efeitos comprovados, especialmente antibacterianos e antioxidantes (Basile *et al.*, 2005; Pimentel *et al.*, 2023).

Essa combinação de alta diversidade, importância socioeconômica e lacunas taxonômicas justifica integrar abordagem de conservação com ferramentas de modelagem e com dados de herbários digitais.

3.2 *Paullinia alata* (Ruiz & Pav.) Don

Paullinia alata é uma liana pertencente à família Sapindaceae, que está amplamente distribuída em florestas tropicais úmidas da América do Sul, especialmente na Amazônia e na Mata Atlântica. Apresenta caules trepadores, folhas compostas 5-folioladas com pecíolos e raques alados, característica que inspira o epíteto específico *alata*, inflorescências caulifloras e frutos obovados, vermelhos na maturidade, com sementes ariladas (Medeiros *et al.*, 2025).

Do ponto de vista etnobotânico, *P. alata* apresenta usos medicinais, alimentares e como ictiotóxico, registrados em comunidades tradicionais e rurais da Amazônia (Beck, 1990; Panizza *et al.*, 2024). Suas folhas e cascas são utilizadas em preparos medicinais com ação tônica e estimulante, enquanto o arilo do fruto pode ser consumido, e as sementes são empregadas na produção de substâncias usadas na pesca artesanal. Estudos recentes reforçam o valor sociocultural das espécies do gênero *Paullinia* no contexto amazônico, associando-as ao manejo sustentável da biodiversidade e à manutenção de saberes tradicionais (Silva *et al.*, 2024). Embora *P. cupana* (guaraná) seja a espécie mais explorada comercialmente, *P. alata* permanece como recurso importante em cadeias locais de plantas medicinais e alimentos florestais (Mafra *et al.*, 2025; Lepsch-Cunha *et al.*, 2024).

Apesar do reconhecido potencial, ainda são escassos os estudos fitoquímicos e farmacológicos específicos para *P. alata*, prevalecendo extrapolações a partir de outras espécies do gênero, conhecidas por conter saponinas, taninos e alcaloides (Beck, 1990). A literatura destaca a necessidade de pesquisas voltadas à padronização de extratos, isolamento de compostos bioativos e avaliação de propriedades terapêuticas dessa espécie, de modo a integrar o conhecimento tradicional a estratégias sustentáveis de uso e conservação (Faria *et al.*, 2022; Mafra *et al.*, 2025). Assim, *Paullinia alata* representa um exemplo expressivo do potencial bioeconômico das trepadeiras neotropicais, unindo relevância ecológica, valor cultural e promissora aplicação fitoterápica.

3.3 *Paullinia cupana* Kunth

O guaraná (*Paullinia cupana* Kunth) é uma planta nativa da bacia amazônica, amplamente cultivada no Brasil, Venezuela e Peru. Dentro do gênero, destacam-se as variedades *P. cupana* H.B.K. *Typica*, encontrada nas regiões amazônicas da Venezuela e

Colômbia, e *P. cupana* var. *sorbilis* (Martius) Ducke, predominante na Amazônia brasileira (Schimpl *et al.*, 2013; Azevedo *et al.*, 2025). O cultivo do guaraná é economicamente relevante, sobretudo nos estados da Bahia e do Amazonas, que em 2021 foram responsáveis por 67% e 23,5% da produção nacional, respectivamente (Conab, 2022). A planta começa a frutificar entre o terceiro e o quarto ano, atingindo produção econômica no quinto, com vida útil de até vinte anos (Weil & Witkoski, 2023). Suas sementes são a principal parte comercial, destacando-se pelo alto teor de cafeína (2,5–6%), superior ao encontrado em *Coffea arabica*, *Camellia sinensis* e *Ilex paraguariensis* (Schimpl *et al.*, 2013), além de conter teobromina, catequina e epicatequina, compostos bioativos responsáveis por efeitos estimulantes e antioxidantes (Bittencourt *et al.*, 2014; Sirena *et al.*, 2024).

Diversos estudos apontam as propriedades farmacológicas e nutricionais do guaraná. Ele apresenta ação antioxidante, antidepressiva, antimicrobiana, antiagregante plaquetária, cardioprotetora e anti-inflamatória (Hamerski *et al.*, 2013; Sirena *et al.*, 2024). Pesquisas com fibroblastos humanos demonstraram redução de estresse oxidativo, danos ao DNA e aumento da atividade da superóxido dismutase (Bittencourt *et al.*, 2014; Sirena *et al.*, 2024), além de elevação de interleucina-10, uma citocina anti-inflamatória (Maldaner *et al.*, 2020). Em modelos experimentais, *P. cupana* mostrou efeito neuroprotetor e anti-envelhecimento em distúrbios como Alzheimer e Huntington (Arantes *et al.*, 2018; Sirena *et al.*, 2024). A composição rica em metilxantinas e polifenóis também está associada a propriedades anticancerígenas, hipocolesterolêmicas e anticarcinogênicas (Torres *et al.*, 2022).

Os efeitos estimulantes do guaraná decorrem principalmente de seu alto teor de cafeína, que atua no sistema nervoso central como antagonista da adenosina, reduzindo a fadiga e melhorando a atenção e o tempo de reação (McLellan *et al.*, 2016; Hack *et al.*, 2023). Ensaios clínicos indicam benefícios na redução da fadiga crônica em pacientes oncológicos, na perda de peso e na melhora da performance cognitiva (Pomportes *et al.*, 2014; Hack *et al.*, 2023). O guaraná, portanto, consolida-se como um produto de relevância medicinal e nutricional, sendo um dos suplementos fitoterápicos mais consumidos globalmente (Hack *et al.*, 2023).

Além dos usos farmacológicos, o guaraná apresenta grande potencial biotecnológico e sustentável. Aproximadamente 70% da produção é destinada à indústria de refrigerantes e bebidas energéticas, enquanto o restante é utilizado em xaropes, extratos, alimentos funcionais e cosméticos (Marques *et al.*, 2019). Resíduos do processamento, como cascas e sementes exauridas, têm sido estudados como matéria-prima para bioplásticos, bioetanol e

embalagens biodegradáveis, contribuindo para a bioeconomia amazônica (Santana & Macedo, 2019; Pinho *et al.*, 2021). Dessa forma, *Paullinia cupana* representa não apenas uma espécie de valor farmacológico consolidado, mas também um recurso estratégico para o desenvolvimento sustentável, integrando biodiversidade, inovação e geração de renda na Amazônia.

3.4 *Paullinia pinnata* L.

A *Paullinia pinnata* L. é um arbusto trepador pertencente à família Sapindaceae, amplamente distribuído em regiões tropicais da América do Sul e da África, incluindo Nigéria, Gana e Togo. Caracteriza-se por folhas compostas com folíolos ovados a elípticos e apresenta grande importância etnobotânica. Historicamente, tem sido utilizada na medicina tradicional para tratar uma variedade de enfermidades, como infecções bacterianas, dores menstruais, disfunção erétil, feridas, picadas de cobra, disenteria, tosse, artrite reumatoide e malária, refletindo seu papel central nas práticas fitoterápicas africanas e sul-americanas (Lunga *et al.*, 2014; Olatujoye *et al.*, 2024).

Estudos fitoquímicos revelam que as folhas de *P. pinnata* contêm elevados teores de compostos fenólicos ($114,6 \pm 10,38$ mg GAE/g) e flavonoides ($19,75 \pm 4,03$ mg RU/g), responsáveis por suas propriedades antioxidantes (Nafiu *et al.*, 2018). As propriedades farmacológicas da espécie abrangem efeitos anti-inflamatórios, antimicrobianos, antitumorais, cardioprotetores, antimaláricos, antihipertensivos e analgésicos (Yu *et al.*, 2020; Ajibade *et al.*, 2022). Estudos recentes confirmam a presença de metabólitos secundários relevantes, como saponinas, taninos, terpenoides, alcaloides, glicosídeos cardíacos e triterpenos, os quais justificam o amplo espectro de atividades biológicas (Adu *et al.*, 2020; Ajibade *et al.*, 2022).

A relevância cultural e medicinal da *P. pinnata* é amplamente reconhecida por comunidades locais em Gana, especialmente nas regiões de Asukese e Amama, onde foi a espécie mais citada em estudos etnobotânicos, com o maior valor de uso (SUV = 18,227) (Asigbaase *et al.*, 2025). Essa ampla aceitação reflete a confiança popular na sua eficácia terapêutica e ressalta a necessidade de estratégias de conservação para garantir sua sustentabilidade. Dada a diversidade de compostos bioativos e o potencial farmacológico demonstrado, *Paullinia pinnata* desponta como uma espécie promissora para o desenvolvimento de novos fármacos naturais e produtos funcionais, reforçando a

importância de investigações contínuas sobre sua composição química, toxicidade e conservação.

3.5 *Paullinia weinmanniifolia* Mart

A *Paullinia weinmanniifolia* Mart. (Sapindaceae) é uma trepadeira lenhosa endêmica do Brasil, com ocorrência registrada nos estados de Alagoas, Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Pernambuco, Rio de Janeiro e Sergipe. Habita predominantemente ecossistemas de restinga, mas também é encontrada em florestas ombrófilas densas e semidecíduais. Suas folhas, geralmente 5-folioladas ou biternadas, apresentam folíolos obovados, com ápice subobtusos e margens dentadas. Essa morfologia, associada a tricomas não glandulares e glandulares, cutícula espessa na face adaxial e presença de laticíferos articulados e não articulados, confere elevada resistência à radiação solar, à salinidade e à escassez de nutrientes típicas do ambiente de restinga (Neto *et al.*, 2017).

Do ponto de vista histoquímico, *P. weinmanniifolia* apresenta substâncias lipofílicas em tricomas e laticíferos, além de compostos como polifenóis, proantocianidinas, açúcares redutores, amido e proteínas distribuídos nos tecidos parenquimáticos (Kuster *et al.*, 2016). Essas substâncias atuam na proteção contra estresse oxidativo e radiação ultravioleta, bem como na defesa química contra herbívoros e microrganismos. A presença de laticíferos é particularmente relevante, desempenhando funções na cicatrização de tecidos, transporte de água e oxigênio e proteção contra patógenos (Ramos *et al.*, 2019). Tais características anatômicas e químicas fazem da espécie um excelente modelo para estudos de ecologia funcional e fisiologia vegetal em ambientes extremos.

Ecologicamente, *P. weinmanniifolia* interage com diversos organismos da fauna e da flora, destacando-se como hospedeira de galhas induzidas por *Paulliniomyia ampla* (Diptera: Cecidomyiidae). Essas galhas, formadas na face abaxial das folhas, exibem organização tecidual complexa, com compartimentos externos e internos especializados, que abrigam o inseto indutor e o protegem de predadores e das condições adversas do ambiente (Costa *et al.*, 2021). Apesar de ser menos abundante em áreas abertas, devido à sua dependência de vegetação subordinada e menor área foliar específica, a espécie contribui para a estabilidade ecológica da restinga, participando do controle microclimático e da manutenção da biodiversidade local (Faria *et al.*, 2022).

A importância econômica, social e ambiental de *P. weinmanniifolia* está associada ao seu papel na manutenção dos ecossistemas costeiros e ao potencial uso de seus compostos

bioativos em biotecnologia e farmacologia. Os metabólitos secundários identificados, como flavonoides e proantocianidinas, apresentam propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias que podem ser exploradas no desenvolvimento de produtos naturais. Além disso, sua presença contribui para a estruturação da vegetação de restinga, protegendo o solo contra erosão e oferecendo abrigo à fauna. Classificada como “Menos Preocupante” (LC) pela IUCN (2019), a espécie não enfrenta ameaça imediata de extinção, mas a crescente degradação dos ambientes costeiros reforça a necessidade de políticas de conservação voltadas à manutenção da flora nativa (Faria *et al.*, 2022).

3.6 Desmatamento na Amazônia e Mudança climática

O desmatamento na Amazônia deixou de ser apenas um problema de perda de cobertura florestal e biodiversidade para se tornar um fator ativo de aceleração da mudança climática. A remoção da floresta reduz a evapotranspiração e, portanto, o aporte de umidade que alimenta o chamado “rio voador” amazônico, enfraquecendo a reciclagem de chuvas sobre a própria bacia e sobre áreas agrícolas do centro-sul da América do Sul. Estudos recentes mostram que a floresta já apresenta sinais de perda de resiliência, isto é, demora mais para se recuperar após secas e incêndios, e que esse enfraquecimento está associado justamente à combinação de desmatamento e aquecimento global (Boulton *et al.*, 2022; Flores *et al.*, 2024). Quando a floresta seca e fragmenta, ela queima mais facilmente, liberando mais CO₂ e reforçando o aquecimento.

Ao mesmo tempo, a Amazônia está deixando de cumprir plenamente seu papel de grande sumidouro de carbono. Com medições atmosféricas de longo prazo, Gatti *et al.* (2021) mostraram que partes do sudeste da Amazônia já se comportam como fonte líquida de CO₂ por causa da conversão de florestas, uso do fogo e aumento da temperatura. Degradação florestal “invisível”, bordas, abertura de clareiras, extração seletiva e incêndios de baixa intensidade, amplia esse efeito e pode atingir área igual ou maior que o desmatamento raso, como destacou Lapola *et al.* (2023) ao classificar a degradação como uma “crise oculta”. Esse conjunto de processos faz com que uma parcela maior do carbono que antes era estocado na biomassa passe a ser devolvido à atmosfera, reduzindo a folga do orçamento global de carbono.

O ponto crítico é que vários desses trabalhos convergem para a ideia de que existe um limiar de perturbação, além do qual partes da Amazônia podem transitar para estados

mais secos e abertos, o que implicaria menos chuva regional e mais emissões de gases de efeito estufa em um ciclo de retroalimentação com o clima global (Flores *et al.*, 2024). Assim, conter o desmatamento e o fogo na Amazônia não é apenas uma agenda de conservação local: é uma medida de mitigação climática com efeito quase imediato, porque evita emissões diretas de CO₂ e preserva os mecanismos biofísicos que mantêm o regime de chuvas sobre a América do Sul.

3.7 Conservação das espécies e Modelagem de nicho ecológico

A conservação das espécies diante do avanço das mudanças climáticas e da degradação ambiental depende, cada vez mais, do uso de ferramentas capazes de prever onde as condições ambientais permanecerão adequadas no futuro. Nesse contexto, a modelagem de nicho ecológico (MNE), também conhecida como modelagem de distribuição de espécies (SDM), tornou-se uma abordagem essencial. Essa técnica relaciona registros de ocorrência de uma espécie com variáveis ambientais, permitindo estimar sua distribuição potencial no espaço e no tempo, identificar áreas prioritárias para conservação e avaliar riscos de extinção. Segundo Vasconcelos *et al.* (2024), houve, nas últimas décadas, avanços significativos na acurácia e na aplicabilidade desses modelos, com melhorias na seleção de variáveis, calibração de algoritmos e tratamento de incertezas, o que ampliou seu uso na conservação e no manejo adaptativo de ecossistemas.

Diversos estudos têm demonstrado a utilidade da MNE para prever os impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade. Carvalho *et al.* (2025) mostraram que o desmatamento e a exploração madeireira intensificam a perda de habitats adequados para espécies amazônicas, especialmente aquelas com distribuição restrita ou dependentes de florestas úmidas. De modo semelhante, Wani *et al.* (2025) observaram que espécies ameaçadas tendem a sofrer forte contração de suas áreas adequadas sob cenários de aquecimento global, indicando a necessidade de estratégias de conservação *ex situ* e da criação de corredores ecológicos. Por outro lado, Zurell *et al.* (2023) destacam que a superpredição causada por dados incompletos ou de baixa qualidade pode comprometer a eficácia dos planos de conservação, sendo essencial combinar os modelos com conhecimento de campo e dados de uso e cobertura da terra para aprimorar a tomada de decisão.

Nos últimos anos, o uso de abordagens integradas, como modelos de conjunto e aprendizado de máquina, tem aprimorado as projeções da MNE, reduzindo incertezas e

fortalecendo a identificação de áreas climática e ecologicamente estáveis, os chamados refúgios de biodiversidade. MacDonald *et al.* (2025) salientam que essas inovações tornam os modelos mais robustos para orientar políticas de conservação, restauração e planejamento territorial, tanto em ecossistemas terrestres quanto marinhos. Dessa forma, a modelagem de nicho ecológico consolida-se como uma ferramenta estratégica na conservação das espécies, contribuindo para antecipar riscos e sustentar decisões baseadas em evidências científicas em um contexto de rápidas transformações ambientais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Conjunto de informações sobre a distribuição das espécies

Os dados com as coordenadas geográficas de *Paullinia alata*, *Paullinia cupana*, *Paullinia pinnata* e *Paullinia weinmanniifolia*, foram delimitados para a América do Sul e obtidos a partir de bases de dados do Centro de Referência em Informação Ambiental, disponível na plataforma *SpeciesLink* (CRIA, 2024) e do Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2024). Essas informações foram coletadas no ano de 2024, no Laboratório de Melhoramento Vegetal da Universidade Federal do Amazonas. Além dessas fontes, foram incluídas coordenadas geográficas a partir de publicações científicas consultadas no levantamento bibliográfico da espécie, informações de dados de herbários virtuais, artigos científicos com dados de populações naturais e de coleções da Universidade Federal do Amazonas e do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia. Esses dados foram coletados no ano de 2024, no laboratório de Melhoramento Vegetal da Universidade Federal do Amazonas.

As coordenadas geográficas foram utilizadas para modelar e gerar camadas relacionadas à distribuição das espécies nos domínios fitogeográficos do Brasil. Todos os dados de ocorrência foram verificados e processados com o auxílio do pacote "*tidyverse*" (Wickham; Wickham, 2017; R Studio, 2024). Durante esse processo, coordenadas invertidas e dados inconsistentes foram excluídos de forma sistemática. Dessa maneira, o viés de amostragem dos dados georreferenciados foi controlado, eliminando-se registros duplicados e mantendo apenas um único registro por pixel.

4.2 Variáveis climáticas e edáficas

Foram selecionadas 33 variáveis ambientais, das quais 19 são bioclimáticas e estão disponíveis no WorldClim versão 2.1, com uma resolução temporal de 2,5 minutos e uma escala de aproximadamente 4 km² por pixel. Essas variáveis são amplamente utilizadas em modelos de distribuição de espécies vegetais e incluem informações sobre tendências anuais, como a temperatura média anual e a precipitação média anual, além de aspectos sazonais, como a variação de temperatura e precipitação ao longo do ano, e fatores ambientais extremos ou limitantes, como as temperaturas do mês mais frio e mais quente, além da precipitação nos trimestres úmido e seco (Fick e Hijmans, 2017).

Foram obtidos 110 registros de *P. alata*, 89 para *P. cupana*, 630 *P. pinnata* e 218 pontos para *P. weinmanniifolia*. Para garantir a precisão dos dados, foram realizadas análises de consistência para excluir dados duplicados, *outliers* e informações incompletas. A verificação das coordenadas foi conduzida utilizando o pacote *tidyverse* no software R (Wickham & Wickham, 2017; R Core Team, 2025). Para evitar o viés de amostragem espacial, conforme recomendado por Aiello-Lammens *et al.* (2015), foi aplicado o pacote *spThin*, no software RStudio. Esse procedimento remove pontos de ocorrência muito próximos entre si, que poderiam gerar uma super-representação de determinadas áreas. Foi adotada uma distância mínima de 5 km entre os pontos, como critério para a filtragem.

Foram utilizadas 19 variáveis bioclimáticas e 14 edáficas, totalizando 33 variáveis ambientais para a predição de distribuição das espécies do gênero *Paullinia*. As variáveis bioclimáticas foram obtidas do *Worldclim – Global Climate Data*, que utiliza dados climáticos mensais espacialmente interpolados em uma escala global e em alta resolução espacial (de 340 km² a 1 km²) (Fick & Hijmans, 2017). Dentre as variáveis climáticas, foram utilizadas 19 bioclimáticas com resolução espacial de 25 minutos extraídas do banco de dados *Worldclim-Global Climate*, estes dados incluem valores mensais de temperaturas mínimas, médias e máximas (°C) e precipitação pluviométrica (mm), com base em dados históricos globais de 1970 a 2000 (Tabela 1).

Tabela 1. Variáveis bioclimáticas (BIO), utilizadas na modelagem da predição de ocorrência das espécies do gênero *Paullinia*.

Código	Variável	Unidade de medida
Bio1	Temperatura média anual	°C
Bio2	Média mensal da variação diária da temperatura (temp. máxima - temp. mínima)	°C
Bio3	Isotermalidade (Bioc2/Bioc7) (* 100)	%
Bio4	Sazonalidade da temperatura (desvio padrão *100)	%
Bio5	Temperatura máxima no mês mais quente	°C
Bio6	Temperatura mínima no mês mais frio	°C
Bio7	Variação anual da temperatura (Bioc5-Bioc6)	°C
Bio8	Temperatura média no trimestre mais úmido	°C
Bio9	Temperatura média no trimestre mais seco	°C
Bio10	Temperatura média no trimestre mais quente	°C
Bio11	Temperatura média no trimestre mais frio	°C
Bio12	Precipitação pluvial acumulada no ano	Mm
Bio13	Precipitação pluvial acumulada no mês mais úmido	Mm
Bio14	Precipitação pluvial acumulada no mês mais seco	Mm
Bio15	Sazonalidade da precipitação pluvial (coeficiente de variação)	Mm
Bio16	Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais úmido	Mm

Bio17	Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais seco	Mm
Bio18	Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais quente	Mm
Bio19	Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais frio	Mm

Fonte: WorldClim (2023).

As variáveis edáficas por sua vez, incluem características físicas e químicas do solo e foram obtidas do banco de dados SoilGrids que percente ao International Soil Reference and Information Centre (ISRIC – World Soil Information) (ISRIC, 2020) e foram representadas na profundidade de 15-30 cm (Tabela 2). Foram utilizadas 14 variáveis, que incluem características químicas e físicas do solo, e que são analisadas em duas profundidades (0–20 cm e 20–40 cm). Essas variáveis podem ser encontradas na versão 2.0 do banco de dados Harmonized World Soil Database, que possui uma resolução espacial de 1 km² (30s) (World Soil Information – ISRIC 2020).

Tabela 2. Variáveis de qualidade do solo, utilizadas na modelagem da predição de ocorrência das espécies do gênero *Paullinia*.

Código	Variável	Unidade de medida
Slope	Declividade	M
Elevation	Elevação	M
Bdod	Densidade aparente	cg/cm ³
Cec	Capacidade de troca catiônica no pH 7	mmol(c)/kg
Cfvo	Fragments grossos volumétricos	cm ³ /dm ³
Clay	Argila	g/kg
Nitrogen	Nitrogênio	cg/kg
Ocd	Densidades de carbono orgânico	hg/m ³
Ocs	Estoque de carbono orgânico do solo	t/há
phh20	PH do solo em H ₂ O	pH*10
Sand	Areia	g/kg
Silt	Silte	g/kg
Soc	Conteúdo de carbono orgânico do solo	dg/kg
Wrb	Classes e probabilidades "World Reference Base"	-

Fonte: International Soil Reference and Information Centre – ISRIC (2024).

4.3 Obtenção de Mapas e Modelagem de nicho ecológico

Os mapas de distribuição das espécies para os cenários futuros foram gerados utilizando as mesmas variáveis ambientais dos modelos de circulação atmosférica HadGEM-GC31-LL (Firpo *et al.*, 2020), IPSL-CM6Ä-LR (Firpo *et al.*, 2020) e MIROC6 (Monteverde *et al.*, 2022). A previsão dos dados climáticos para cenários futuros foi realizada com base nas projeções de

mudanças climáticas do sexto relatório do IPCC (2021), utilizando dados climáticos reduzidos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6). Esses dados encontram-se disponíveis no WorldClim e estão organizados em períodos (2041-2060, 2061-2080, 2081-2100). São categorizados em dois cenários distintos dos *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP): o SSP2-4.5, é considerado o “menos pessimista”, onde assume-se que políticas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa serão implementadas globalmente, e o cenário SSP5-8.5 “mais pessimista”, considera que não haverá estratégias para redução de emissões de gases de efeito estufa.

Para controlar a multicolinearidade entre as variáveis ambientais utilizadas, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA), e foram selecionados os componentes principais (PCs) que mais contribuíram na análise, ou seja, aqueles responsáveis por pelo menos 95% da variabilidade total dos dados (Evangelista-Vale *et al.*, 2021).

Para as projeções atuais e futuras, foi utilizado o modelo de circulação atmosférica CNRM-CM6-1 do CNRM-CERFACS (Centro Nacional de Pesquisas Meteorológicas e Centro Europeu de Pesquisa e Formação Avançada em Cálculo Científico). Na construção dos modelos futuros foram mantidos os componentes principais (PCs) e algoritmos selecionados para os modelos presentes. As mudanças climáticas foram projetadas para os períodos de 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100, considerando dois cenários diferentes de emissões de gases de efeito estufa (CO₂): SSP245 e SSP585 (SSP - Shared Socio-economic Pathways) (Fick & Hijmans, 2017).

Os algoritmos utilizados foram o Bioclim - BIO (Nix, 1986), Maximum Entropy - MXD (Anderson & Gonzalez, 2011), Random Forests - RDF (Prasad *et al.*, 2006), Support Vector Machine - SVM (Prasad *et al.*, 2006) e Generalized Linear Models – GLM (R Core Team, 2025), os quais permitiram gerar um modelo consenso a fim de selecionar o que apresentou melhor qualidade preditiva.

A avaliação dos modelos foi realizada utilizando sete métricas diferentes: a Área sob a curva (AUC) (Fielding & Bell, 1997), Kappa (Cohen, 1968), True Skill Statistic (Allouche *et al.*, 2006), Jaccard (Leroy *et al.*, 2018), Sorensen (Leroy *et al.*, 2018). Foram considerados bons modelos aqueles com valores superiores a 0,7 em todas as métricas (Fielding & Bell, 1997; Allouche *et al.*, 2006; Leroy *et al.*, 2018). E para esse propósito, foi utilizado o pacote ENMTML (Andrade *et al.*, 2020) no software R (R Core Team, 2025). Com base nesses modelos, foram gerados mapas binários para a espécie-alvo, utilizando o consenso dos modelos

que apresentaram boas métricas de avaliação e considerando os valores máximos de sensibilidade e especificidade (MX_TSS).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi empregada uma abordagem mista (pontos de ocorrência, banco de dados e pesquisas de campo utilizando o sistema de Posicionamento Global (GPS) para a utilização dos registros de ocorrência das espécies *Paullinia alata*, *Paullinia cupana*, *Paullinia pinnata* e *Paullinia weinmanniifolia*, sendo obtidos respectivamente, após a redução espacial um total de 71, 59, 422 e 121 pontos de ocorrência utilizados na modelagem de nicho ecológico. A distribuição potencial das espécies de guaraná variou consideravelmente, sendo *P. alata* e *P. cupana* amplamente distribuídas no domínio fitogeográfico Amazônia (Figura 1a,b), enquanto *P. pinnata* apresenta ampla ocorrência, com exceção do Pampa (Figura 1c). A espécie *P. weinmanniifolia* apresenta uma área de distribuição mais estreita nos domínios Caatinga e Mata Atlântica (Figura 1d).

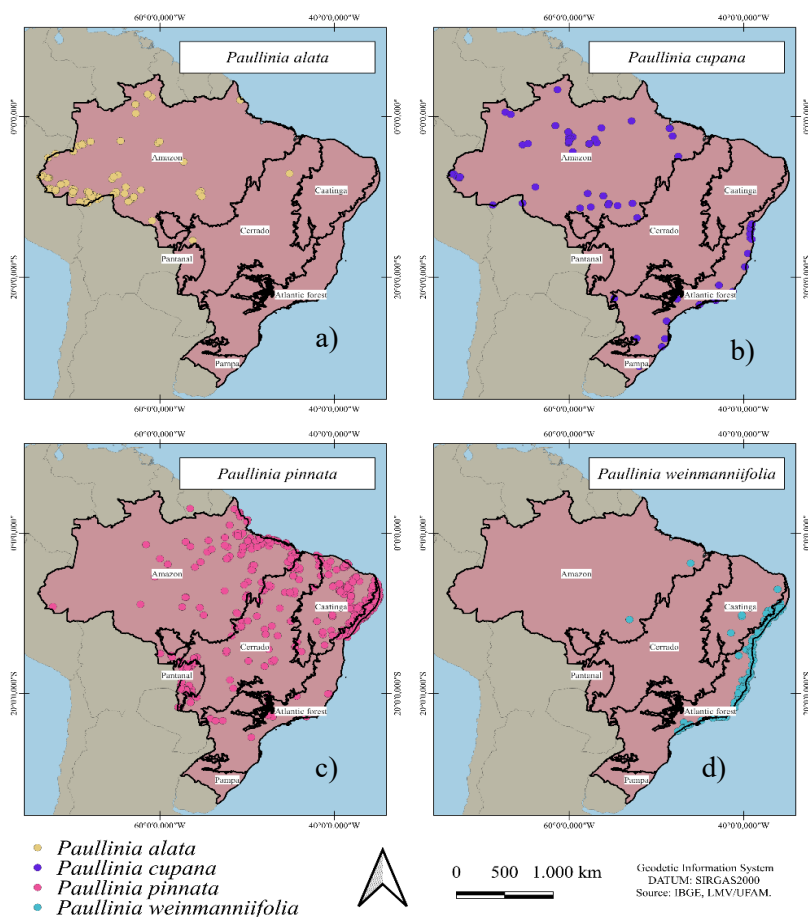


Figura 1. Pontos de ocorrência de a) *Paullinia alata*, b) *Paullinia cupana*, c) *Paullinia pinnata* e d) *Paullinia weinmanniifolia* na América do Sul, após a redução espacial.

A modelagem referente ao período presente para *P. alata* indica maior probabilidade de ocorrência da espécie no domínio fitogeográfico Amazônia e baixa probabilidade de ocorrência

nos domínios Caatinga, Cerrado, Pantanal, Mata Atlântica e Pampa (Figura 2a). Para *P. cupana* é possível verificar maior probabilidade da ocorrência na maioria dos domínios fitogeográficos e baixa probabilidade no domínio Caatinga (Figura 1b). A espécie *P. pinnata* apresenta maiores áreas com adequabilidade ambiental quando comparadas às outras espécies de guaraná (Figura 1c). A espécie *P. weinmanniifolia* é considerada mais sensível quanto aos efeitos da mudança climática, apresentando baixa probabilidade de ocorrência da espécie em todos os domínios fitogeográficos brasileiros (Figura 1d).

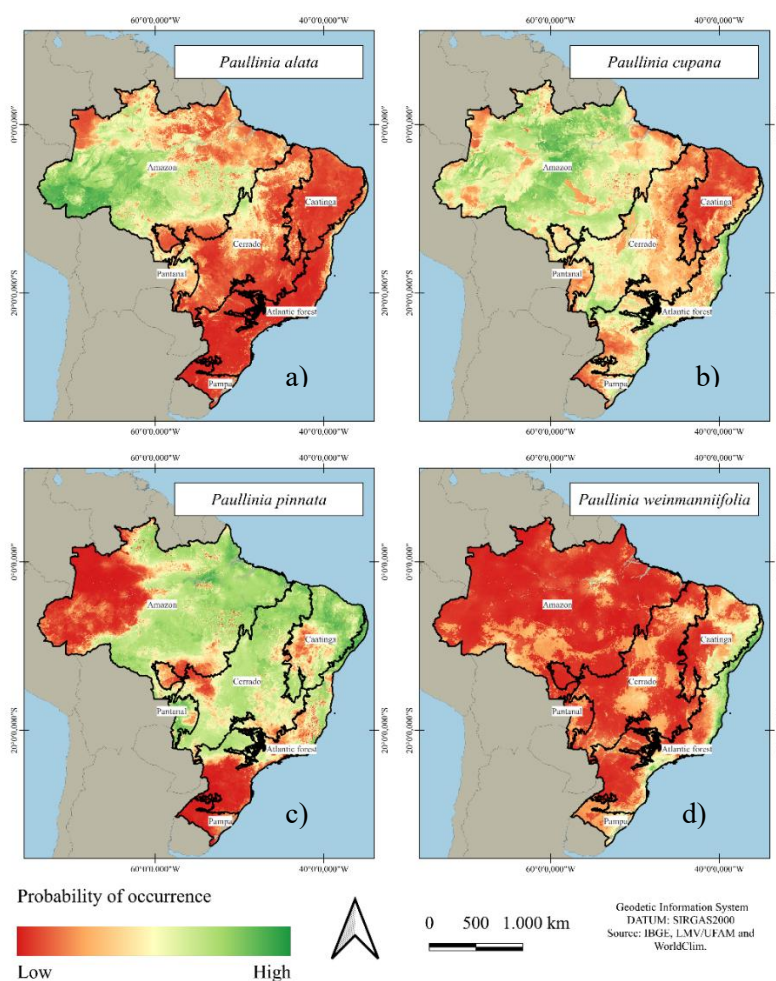


Figura 2. Projeção referente ao período presente (2009-2019) para as espécies a) *Paullinia alata*, b) *Paullinia cupana*, c) *Paullinia pinnata* e d) *Paullinia weinmanniifolia* na América do Sul.

As projeções para o cenário menos pessimista SSP2-4.5 e mais pessimista SSP5-8.5 nos intervalos de tempo 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 indicam áreas de baixa probabilidade de ocorrência de *P. alata* em todos os domínios fitogeográficos brasileiros (Figura 3a, b, c, d, f), contudo, observam-se pequenos refúgios de maior probabilidade de ocorrência da espécie no domínio Amazônia (Figura 3a, b, c, d, e). Para *P. cupana* no cenário menos pessimista SSP2-

8.5 e mais pessimista SSP5-8.5 ocorre redução gradual da espécie, no entanto, são verificadas maiores áreas com adequação ambiental para a sua ocorrência (Figura 3g, h, i, j, k, l).

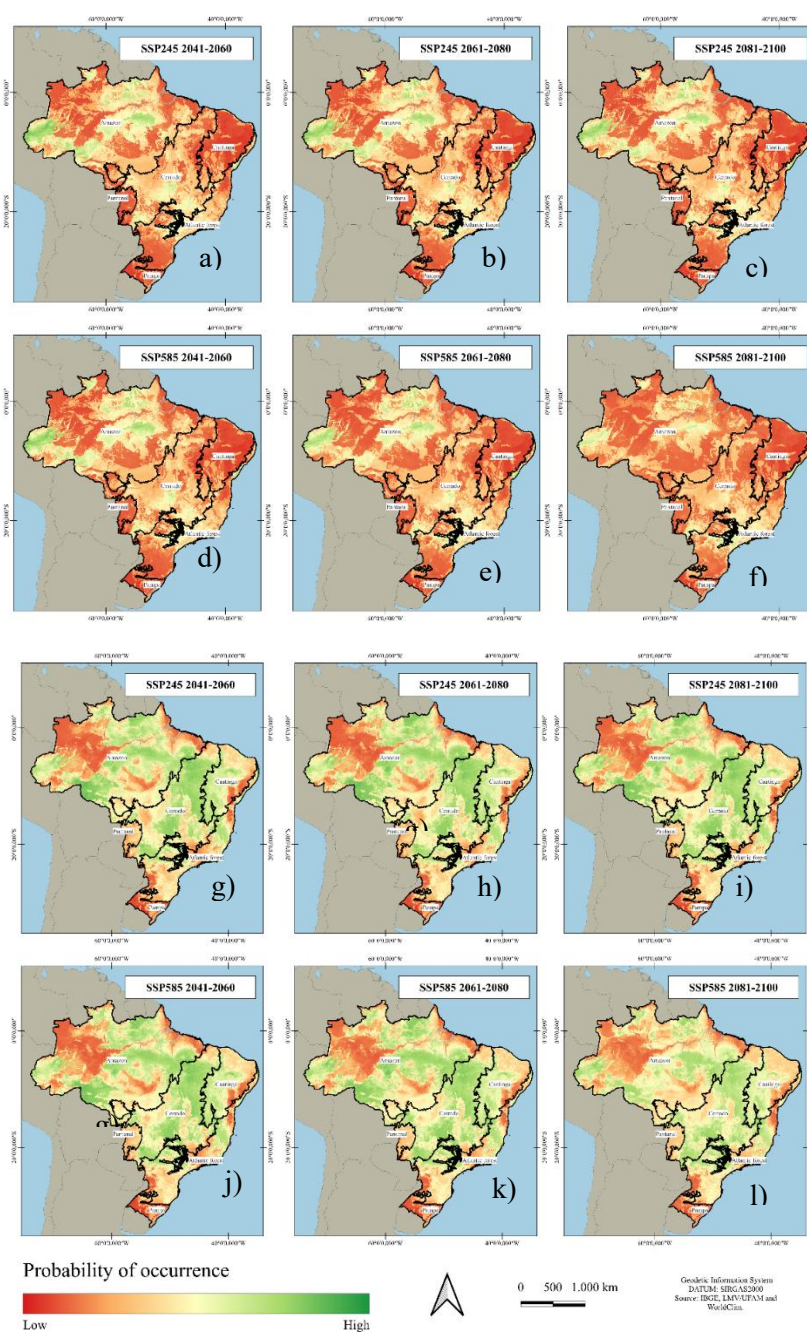


Figura 3. Projeção da adequabilidade ambiental de *Paullinia alata* e *Paullinia cupana*, no cenário climático menos pessimista SSP2-4.5 (a, b, c), (g, h, i) mais pessimista SSP5-8.5 (d, e, f), (j, k, l) nos intervalos de tempo 2041-2060 (a, d), (g, j), 2061-2080 (b, e), (h, k) e 2081-2100 (c, f), (i, l), respectivamente.

A partir da projeção realizada para *P. pinnata* é verificado que houve baixa probabilidade de ocorrência da espécie nos cenários futuros, sendo registradas perdas de áreas com adequabilidade ambiental intensificadas nos cenários mais pessimistas e menos pessimistas em todos os domínios fitogeográficos (Figura 4a, b, c, d, f). Além disso, baixa probabilidade de

ocorrência de *P. weinmanniifolia* é verificada no domínio Amazônia, sugerindo que *P. pinnata* e *P. weinmanniifolia* sejam mais sensíveis quanto aos efeitos da mudança climática (Figura 4).

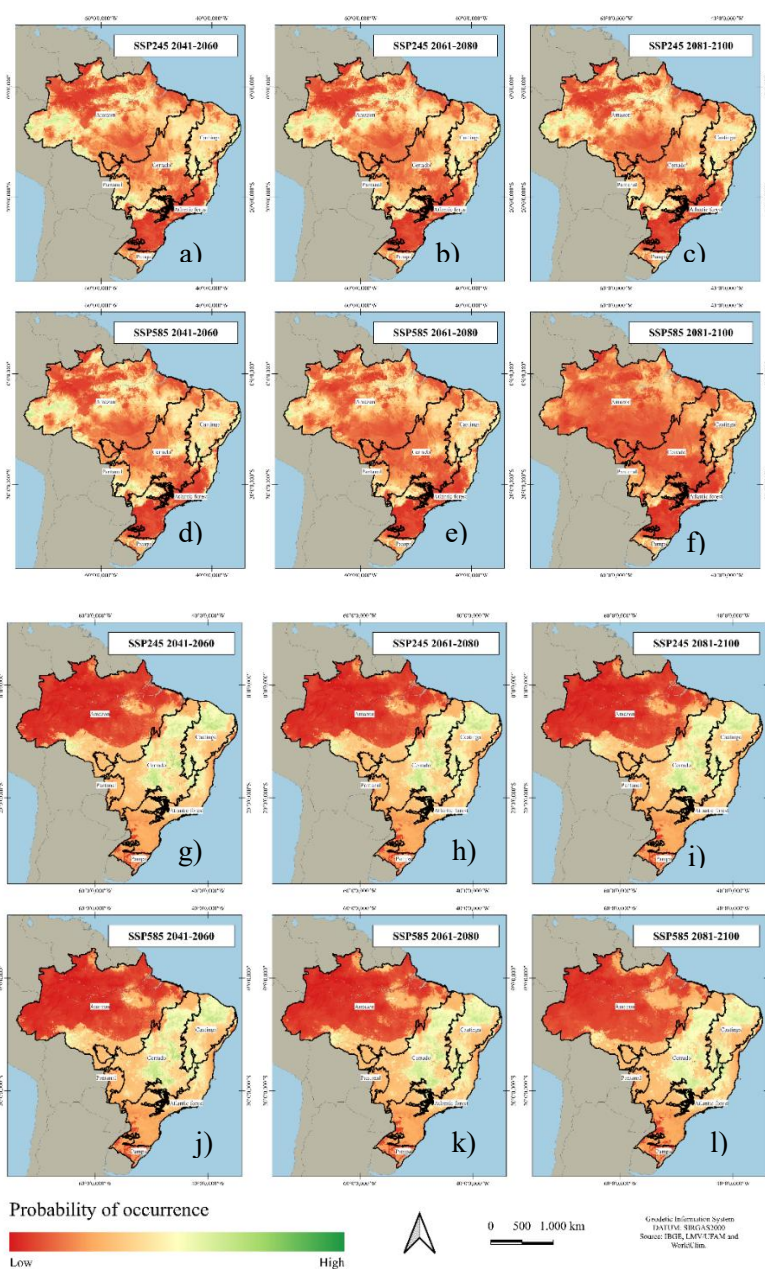


Figura 4. Projeção da adequabilidade ambiental de *Paullinia pinnata* e *Paullinia weinmanniifolia*, no cenário climático menos pessimista SSP2-4.5 (a, b, c), (g, h, i) mais pessimista SSP5-8.5 (d, e, f), (j, k, l) nos intervalos de tempo 2041-2060 (a, d), (g, j), 2061-2080 (b, e), (h, k) e 2081-2100 (c, f), (i, l), respectivamente.

Dentre as variáveis que mais contribuíram para explicar a distribuição das espécies de guaraná *P. alata*, *P. cupana*, *P. pinnata* e *P. weinmanniifolia*, pode-se destacar a variação anual da temperatura no componente principal (PC 29), temperatura média no trimestre mais frio (PC 30), precipitação pluvial acumulada no ano (PC 31), precipitação pluvial acumulada no

trimestre mais seco (PC 28) e Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais quente (PC 26) (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de autovetores dos seis componentes principais (PC) das variáveis bioclimáticas e edáficas utilizados no processo de modelagem de nicho ecológico das espécies de guaraná.

Variáveis	Unidade	PC26	PC27	PC28	PC29	PC30	PC31
Temperatura média anual	°C	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00
Média mensal da variação diária da temperatura	°C	0,17	-0,31	-0,12	-0,33	-0,73	-0,21
Isotermalidade	%	0,25	-0,27	-0,07	0,25	0,04	0,00
Sazonalidade da temperatura	%	-0,14	0,10	0,03	-0,16	-0,02	0,01
Temperatura máxima no mês mais quente	°C	0,10	-0,23	-0,07	0,19	-0,16	0,37
Temperatura mínima no mês mais frio	°C	-0,23	0,39	0,17	0,33	-0,12	0,00
Variação anual da temperatura	°C	0,06	0,00	0,05	0,53	-0,04	-0,01
Temperatura média no trimestre mais úmido	°C	-0,29	0,35	0,08	-0,48	-0,04	0,00
Temperatura média no trimestre mais seco	°C	-0,12	0,13	0,04	0,05	0,01	0,01
Temperatura média no trimestre mais quente	°C	-0,10	0,12	0,02	-0,01	0,01	0,00
Temperatura média no trimestre mais frio	°C	0,14	-0,27	-0,11	-0,22	0,63	-0,37
Precipitação pluvial acumulada no ano	mm	0,07	-0,10	-0,05	-0,26	0,17	0,82
Precipitação pluvial acumulada no mês mais úmido	mm	-0,08	-0,02	-0,38	0,04	-0,01	0,01
Precipitação pluvial acumulada no mês mais seco	mm	0,37	0,35	-0,31	-0,02	-0,01	0,00
Sazonalidade da precipitação pluvial	mm	-0,44	-0,14	-0,35	0,07	0,01	0,00
Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais úmido	mm	0,00	0,03	-0,01	0,01	0,00	0,00
Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais seco	mm	-0,32	-0,44	0,56	0,00	0,02	0,00

Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais quente	mm	0,50	0,17	0,50	-0,10	-0,01	0,00
Precipitação pluvial acumulada no trimestre mais frio	mm	-0,03	0,07	0,02	0,03	0,00	0,00
Capacidade de troca catiônica	mmol(c)/kg	0,00	0,01	-0,01	-0,02	0,00	0,00
Fragmentos grossos volumétricos	cm ³ /dm ³	0,00	-0,03	0,00	-0,01	0,00	0,00
Argila	g/kg	-0,02	0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,00
Elevação	m	-0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrogênio	cg/kg	-0,04	0,01	0,01	0,04	0,00	0,00
Densidades de carbono orgânico	hg/m ³	-0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Estoque de carbono orgânico do solo	t/ha	-0,03	0,02	0,00	-0,01	-0,01	0,00
pH do solo em água	pH*10	0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
Areia	g/kg	0,00	-0,02	0,01	-0,01	0,01	0,00
Silte	g/kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Declividade	m	0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Conteúdo de carbono orgânico do solo	g/kg	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Classes e probabilidades		0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Densidade aparente	cg/cm ³	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Com base na avaliação dos modelos AUC, Kappa, TSS, Jaccard e Sorensen, todos os valores iguais ou superiores a 0,60 e valores de AUC superiores a 0,85 foram considerados satisfatórios (Tabela 4). A análise individual dos modelos permitiu verificar valores de estimativa mais elevados para Kappa e Sorensen e apresentaram maior precisão nos algoritmos BIO e SVM (Tabela 2). Entre os algoritmos analisados foi verificado para *P. alata* (0,978±0,164), *P. cupana* (0,929±0,189), *P. pinnata* (0,992±0,035) e *P. weinmanniifolia* (0,991±0,034) (Tabela 2). Com isso, os resultados indicam que os modelos em conjunto com os algoritmos analisados apresentam um bom desempenho e oferecem resultados precisos na análise da distribuição potencial das espécies de guaraná.

Tabela 4. Variáveis indicadoras e desvio padrão (DP) para validação de seis modelos para a predição da área potencial de ocorrência das espécies de espécies *Paullinia alata*, *Paullinia cupana*, *Paullinia pinnata* e *Paullinia weinmanniifolia*.

<i>P. alata</i>						
Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁷	0,852±0,082	0,704±0,025	0,704±0,060	0,704±0,017	0,817±0,028	0,852±0,019
Kappa	0,963±0,016	0,890±0,087	0,890±0,170	0,902±0,077	0,947±0,055	0,963±0,057
TSS ⁸	0,856±0,164	0,647±0,087	0,647±0,170	0,720±0,077	0,833±0,055	0,856±0,057
Jaccard	0,978±0,164	0,889±0,063	0,889±0,102	0,896±0,070	0,944±0,047	0,978±0,048
Sorensen	0,964±0,126	0,874±0,036	0,874±0,073	0,883±0,039	0,937±0,026	0,964±0,027
<i>P. cupana</i>						
Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁷	0,816±0,095	0,632±0,035	0,632±0,083	0,632±0,067	0,761±0,048	0,816±0,026
Kappa	0,924±0,189	0,765±0,088	0,765±0,173	0,799±0,151	0,887±0,147	0,924±0,107
TSS ⁸	0,865±0,189	0,717±0,088	0,717±0,173	0,749±0,151	0,851±0,147	0,865±0,107
Jaccard	0,929±0,189	0,783±0,070	0,783±0,149	0,825±0,120	0,900±0,089	0,929±0,061
Sorensen	0,926±0,140	0,732±0,043	0,732±0,091	0,781±0,072	0,875±0,055	0,926±0,039
<i>P. pinnata</i>						
Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁷	0,962±0,019	0,877±0,005	0,877±0,005	0,879±0,010	0,935±0,004	0,962±0,006
Kappa	0,992±0,035	0,934±0,030	0,934±0,027	0,936±0,058	0,967±0,024	0,992±0,039
TSS ⁸	0,989±0,035	0,912±0,030	0,912±0,027	0,917±0,058	0,957±0,024	0,989±0,039
Jaccard	0,982±0,031	0,867±0,028	0,867±0,025	0,877±0,051	0,934±0,023	0,982±0,036
Sorensen	0,991±0,018	0,934±0,015	0,934±0,013	0,936±0,030	0,967±0,012	0,991±0,019
<i>P. winmanniifolia</i>						
Métricas	BIO ¹	GAU ²	GLM ³	MXD ⁴	RDF ⁵	SVM ⁶
AUC ⁷	0,893±0,037	0,785±0,023	0,785±0,013	0,785±0,013	0,878±0,012	0,893±0,017
Kappa	0,983±0,074	0,975±0,037	0,975±0,030	0,975±0,035	0,987±0,041	0,983±0,035
TSS ⁸	0,966±0,074	0,917±0,037	0,917±0,030	0,919±0,035	0,958±0,041	0,966±0,035
Jaccard	0,991±0,074	0,967±0,037	0,967±0,028	0,968±0,033	0,983±0,039	0,991±0,034
Sorensen	0,989±0,048	0,959±0,019	0,959±0,015	0,961±0,017	0,980±0,020	0,989±0,017

¹BIO = Bioclim; ²GAU = Bayesian Gaussian Process; ³GLM = Generalized Linear Models; ⁴MXD = Maximum Entropy Default; ⁵RDF = Random Forests; ⁶SVM = Support Vector Machine; ⁷AUC = Area Under the Curve e

⁸TSS = True Skill Statistics.

Com as projeções futuras é possível verificar que as espécies *P. alata* e *P. cupana* apresentam comportamento similares, abrangendo quase todos os domínios fitogeográficos brasileiros, com maior extensão de área no domínio fitogeográfico Amazônia (Tabela 5). Houve expansão de áreas com adequabilidade ambiental para as duas espécies, cujo aumento de áreas expressivos foram observados na Mata Atlântica, Caatinga e Cerrado nos cenários mais e menos pessimista nos três intervalos de tempo para *P. alata* (Tabela 3). Por outro lado, o Pantanal e Amazônia foram os domínios que apresentaram maiores perdas de áreas com adequação climática para a sua ocorrência. Para *P. cupana* também foram observados aumento de áreas nos domínios Caatinga e Cerrado e perdas expressivas no domínio Pampa que alcançou 96,23% em perdas de áreas com adequabilidade ambiental no cenário menos pessimista no intervalo 2041-2060 (Tabela 5).

A espécie *P. pinnata* foi a que apresentou maior sensibilidade em função das variáveis edáficas. Como maior área de abrangência na Amazônia e Cerrado, os dois cenários apresentaram perdas consideráveis de áreas com adequação ambiental, alcançando a sua totalidade no cenário mais pessimista no intervalo 2061-2080 para todos os domínios com exceção do Pampa que não houve ocorrência no período de referência (Tabela 5). Foi verificado que para *P. weinmanniifolia* a sua maior área de abrangência está no domínio Mata Atlântica e segundo as projeções, nos dois cenários e intervalos de tempo haverá aumento de áreas com adequabilidade ambiental para os domínios Amazônia, Caatinga e Cerrado e perdas de áreas no domínio Mata Atlântica (Tabela 5). Os domínios Pampa e Pantanal mostraram-se sensíveis com perdas de 100% da sua área logo no cenário menos pessimista no intervalo 2041-2060 (Tabela 5).

Tabela 5. Projeções de acréscimo (+) ou perda (-) de área de adequabilidade ambiental (%) nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 nos intervalos de tempo 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100, em comparação com o período atual (km²) na América do Sul, para as espécies *Paullinia alata*, *Paullinia cupana*, *Paullinia pinnata* e *Paullinia weinmanniifolia*.

		<i>P. alata</i>					
		SSP2-4.5			SSP5-8.5		
Coverage	Current Period (km ²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazon	2.918.248,88	-31,95	-32,46	-36,34	-34,70	-41,31	-61,28
Caatinga	8.521,42	312,47	344,27	300,76	297,20	270,23	234,35
Cerrado	407.726,99	122,06	117,04	105,35	113,50	92,73	55,51
Atlantic Forest	41.999,96	871,76	982,76	955,55	905,78	1022,15	1064,27
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	73.873,95	-87,35	-88,32	-87,79	-88,05	-90,55	-89,70

Total	3.450.371	-3,09	-2,70	-7,79	-6,06	-12,80	-33,22
<i>P. cupana</i>							
SSP2-4.5				SSP5-8.5			
Coverage	Current Period (km ²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazon	3.344.081,16	-26,36	-24,79	-25,21	-25,46	-22,70	-31,55
Caatinga	21.292,70	2693,69	2677,60	2638,59	2675,46	2580,86	2372,61
Cerrado	801.728,64	104,39	103,91	117,94	113,58	119,84	119,07
Atlantic Florest	631.864,08	-8,61%	-5,52	-5,06	-6,84	1,18	6,70
Pampa	77.083,04	-96,23%	-89,87	-91,98	-95,22	-91,70	-85,68
Pantanal	26.106,32	3,82%	-6,81	-4,15	-3,82	-10,71	-37,79
Total	4.902.156	8,19%	9,55	11,43	10,43	13,98	7,57
<i>P. pinnata</i>							
SSP2-4.5				SSP5-8.5			
Coverage	Current Period (km ²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazon	2.524.854,35	-75,98	-74,41	-81,62	-77,20	-100,00	-99,67
Caatinga	676.986,38	-72,48	-74,14	-78,62	-75,22	-100,00	-95,57
Cerrado	1.647.690,58	-87,13	-90,81	-92,91	-89,45	-100,00	-99,71
Atlantic Forest	500.443,46	-67,55	-67,19	-72,19	-67,71	-100,00	-88,21
Pampa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pantanal	136.451,07	-70,52	-79,33	-81,44	-76,29	-100,00	-100,00
Total	5.486.426	-77,89	-78,61	-83,63	-79,60	-100,00	-97,82
<i>P. weinmanniifolia</i>							
SSP2-4.5				SSP5-8.5			
Coverage	Current Period (km ²)	2041-2060	2061-2080	2081-2100	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Amazon	3.035,62	1545,00	1362,86	1135,71	1352,14	859,29	225,00
Caatinga	153.342,12	114,92	111,93	111,88	100,93	103,46	104,14
Cerrado	607,12	90117,86	88460,71	105189,29	93571,43	101925,00	94928,57
Atlantic Florest	255.750,89	-83,02	-80,78	-77,88	-81,51	-70,42	-62,28
Pampa	17.931,83	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
Pantanal	65,05	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00
Total	430.733	125,35	122,00	145,68	124,78	140,56	131,31

As espécies *P. alata*, *P. cupana*, *P. pinnata* e *P. weinmanniifolia* desempenham um papel importante no âmbito social, cultural e tradicional de povos originários, comunidades locais na Amazônia e em todo o território brasileiro (Silva *et al.* 2022; Nascimento *et al.* 2023; Silva *et al.* 2024; Rocha *et al.* 2024) e contribuem diretamente para a manutenção da flora e fauna local (Nascimento *et al.* 2022; Marinho *et al.* 2024).

As alterações climáticas prejudicam a ocorrência e permanência dessas espécies no ambiente, bem como sua reprodução e possibilidade de expansão para áreas com adequabilidade ambiental. Dessa forma, a análise da distribuição geográfica atual e futura possibilita a identificação de áreas ideais para zonas de cultivos dessas espécies e auxilia na prevenção dos possíveis impactos ocasionados, especialmente com a mudança na cobertura primária de culturas agrícolas (Brito *et al.* 2022). Além disso, permite o embasamento de estratégias de conservação de germoplasma pelos povos originários da Amazônia, fortalecendo a identidade cultural da região (Emperaire, 2024).

Essas espécies de guaraná ocorrem em diversos domínios fitogeográficos, como por exemplo, *P. pinnata* que apresenta ampla distribuição no território brasileiro, com exceção do Pampa. Este comportamento demonstra a capacidade de adaptação e distribuição destas espécies, destacando sua importância para a resiliência ecológica e mitigação de impactos climáticos regionais (Zobel *et al.* 2024; Lu *et al.* 2024). No entanto, as projeções apontam a sensibilidade climática de *P. pinnata* e *P. weinmanniifolia*, sendo especialmente vulneráveis à perda de áreas de adequabilidade ambiental, ressaltando a necessidade de preservar habitats sensíveis à mudança climática, a fim de garantir sua sobrevivência.

Além da importância ecológica, as espécies apresentam usos econômicos diretos e indiretos, como o guaranazeiro (*P. cupana*) que é amplamente cultivado na Amazônia e está associado a produção e comércio, agricultura sustentável e ao impacto socioeconômico positivo para as comunidades locais (Atroch e Nascimento Filho, 2018), pois destaca-se como símbolo cultural e econômico, especialmente para os povos originários e comunidades rurais, sendo utilizado em práticas tradicionais, como cerimônias e na medicina ancestral, reforçando a identidade cultural coletiva dessas populações (Martins e Vasconcellos, 2020; Congretel e Pinton, 2020).

O guaranazeiro apresenta ampla adaptabilidade garantindo sua presença em diferentes domínios fitogeográficos brasileiros, com notável distribuição na Amazônia. Esta cultura impulsiona o comércio interno e as exportações, consolidando o Brasil como o maior produtor global dessa matéria-prima, beneficiando desde pequenos agricultores até grandes indústrias multinacionais (Moreto, 2024; Lima *et al.* 2024). Esse cenário reforça a relevância do guaranazeiro não apenas como uma *commodity* econômica, mas também como um elemento estratégico para o desenvolvimento sustentável e a manutenção cultural das populações amazônicas, que dependem diretamente desse cultivo para subsistência e fortalecimento da identidade (Sousa *et al.* 2024).

No âmbito da segurança alimentar, essas espécies desempenham papéis diversificados. Enquanto o guaranazeiro é reconhecido por seu valor energético e nutritivo, espécies como *P. pinnata* e *P. alata* contribuem indiretamente por meio de seus usos na biodiversidade, promovendo a polinização e o equilíbrio ecológico (Marinho *et al.* 2024). O estudo demonstra que, embora *P. pinnata* e *P. weinmanniifolia* sejam mais vulneráveis à mudança climática, estratégias de manejo sustentável podem garantir sua conservação e uso futuro (Salgrota e Chauhan, 2023). Ao identificar novas áreas de adequação climática para o cultivo de *P. cupana*, por exemplo, é possível planejar uma produção resiliente, assegurando a continuidade do fornecimento alimentar e econômico para comunidades dependentes.

Para garantir o manejo sustentável dessas espécies, é essencial adotar soluções inovadoras e adaptativas. Além disso, a educação e a conscientização desempenham papéis cruciais na promoção da conservação e do uso responsável destas espécies vegetais (Ogwu e Osawaru, 2022). Capacitar comunidades sobre práticas agrícolas que respeitem os limites ambientais e o potencial de cada região é essencial para garantir o equilíbrio entre produção e preservação. Campanhas que unam saberes científicos e conhecimentos tradicionais podem não apenas reforçar a importância das espécies para a biodiversidade, mas também destacar seu valor econômico e cultural (Congretel e Pinton, 2020; Mbelebele *et al.* 2024). Incluir a conservação de espécies como as do gênero *Paullinia* em programas educacionais e políticas públicas pode aumentar a conscientização social sobre os desafios impostos pela mudança climática e incentivar ações coletivas para sua preservação (Congretel e Pinton, 2020).

Investimentos em sistemas agroflorestais, que integram o cultivo de espécies do gênero *Paullinia* à preservação de florestas nativas, podem contribuir para a resiliência ecológica das áreas cultivadas e aumentar a produtividade sem comprometer o equilíbrio ambiental (Abramovay *et al.* 2020). Assim como a seleção e o desenvolvimento de cultivares mais resistentes às condições climáticas futuras são estratégias promissoras, especialmente para *P. cupana*, cujo potencial comercial incentiva pesquisas avançadas (Nascimento *et al.* 2024; Sarma *et al.* 2024). A adoção de práticas agrícolas que minimizem o uso de insumos químicos e promovam a conservação do solo e da água fortalecerá a sustentabilidade a longo prazo (Gamage *et al.* 2023 Raihan, 2023).

Além disso, políticas públicas que incentivem o uso sustentável e apoiem comunidades locais na transição para práticas agrícolas adaptadas serão essenciais para proteger o patrimônio natural e cultural que essas espécies representam (Lucchi *et al.* 2024), principalmente se associadas ao suporte técnico e financeiro às comunidades locais durante

esta adaptação de cultivos. Isto será essencial para promover um uso responsável dos recursos naturais e proteger a biodiversidade associada a estas espécies pertencentes ao gênero *Paullinia*, principalmente o guaranazeiro (Mondal e Palit, 2022).

Para a conservação dessas espécies, é essencial identificar os refúgios climáticos, como o estudo demonstrou (Selwood e Zimmer, 2020). Mesmo nos cenários climáticos menos pessimistas, áreas de alta adequabilidade climática são observadas e estas regiões são fundamentais para a manutenção da diversidade genética, além de oferecer oportunidades para conservação *in situ* (Sarath *et al.* 2024; Soliani *et al.* 2024), como é o caso de *P. alata*, em que os refúgios na Amazônia podem ser utilizados para a criação de áreas protegidas para espécie, enquanto para *P. cupana*, as expansões previstas em domínios fitogeográficos como Cerrado e Caatinga destacam oportunidades de uso sustentável e cultivo adaptado às novas condições ambientais (Silva e Arima, 2023). A delimitação de tais áreas exige esforços integrados entre pesquisadores, gestores ambientais e comunidades locais (Wu *et al.* 2023).

A aplicação de estudos de distribuição geográfica de espécies do gênero *Paullinia* reforça a importância de decisões baseadas em dados para garantir a sustentabilidade. A combinação de ciência, políticas públicas e ações comunitárias oferece um caminho viável para equilibrar a conservação destas espécies com seu uso econômico. Investir em pesquisas contínuas e na disseminação dos resultados entre gestores e comunidades é fundamental para adaptar estratégias de conservação às condições climáticas e sociais em constante evolução, assegurando o futuro de *P. alata*, *P. cupana*, *P. pinnata* e *P. weinmanniifolia*.

5. CONCLUSÃO

As espécies do gênero *Paullinia*, respondem de maneira diferenciada à mudança climática, definindo distintos graus de vulnerabilidade e potencial de adaptação. Enquanto *P. alata* e *P. cupana* apresentam maior resiliência ambiental e tendência à manutenção ou expansão de suas áreas de adequabilidade em cenários futuros, *P. pinnata* e *P. weinmanniifolia* apresentam elevada sensibilidade, com projeções indicando perdas expressivas de habitat, principalmente sob cenários mais pessimistas de emissões. Os resultados do presente estudo reforçam que a conservação do gênero demandará estratégias específicas e direcionadas, considerando tanto os refúgios climáticos identificados quanto as áreas de maior fragilidade ecológica.

O uso de ferramentas de modelagem de nicho ecológico permitiu identificar áreas prioritárias para conservação, além de fornecer subsídios para o planejamento de sistemas agroflorestais e manejo sustentável a fim de promover a resiliência ecológica e a segurança alimentar. A identificação de áreas prioritárias, como Amazônia, Cerrado e Caatinga, oferece suporte direto ao fortalecimento da bioeconomia regional, à proteção da diversidade genética e ao desenvolvimento de cultivares e práticas agrícolas adaptadas às condições climáticas futuras.

Para enfrentar os desafios climáticos, é essencial adotar estratégias integradas, combinando ciência, políticas públicas e conhecimentos tradicionais para promover o uso sustentável das espécies de guaraná. A implementação de sistemas agroflorestais, conservação *in situ*, recuperação de áreas degradadas e programas de melhoramento genético serão essenciais para assegurar a sobrevivência e a continuidade socioeconômica das espécies de *Paullinia*, sobretudo do guaranazeiro, que possui valor cultural, econômico e ecológico inestimável para a Amazônia.

6. REFERÊNCIAS

- ABRAMOVAY, R.; FERREIRA, J.; COSTA, F. D. A.; EHRLICH, M.; EULER, A. M. C.; YOUNG, C. E. F.; VILLANOVA, L. The new bioeconomy in the Amazon: Opportunities and challenges for a healthy standing forest and flowing rivers. Amazon Assessment Report 2021. United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA, 2021. Disponível em: <https://www.theamazonwewant.org/spa-reports/> e <https://doi.org/10.55161/UGHK1968>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- ADU, C. A. T.; YEABOAH, A.; ARTHUR, F. J. Antihypertensive Activity of *Paullinia pinnata* Leaf Extract in Animal Models. SSRN, 2020. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=3874988> ou <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3874988>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- AIELLO-LAMMENS, M. E.; BORJA, R. A.; RADOSAVLJEVIC, A.; VILELA, B.; ANDERSON, R. P. SpThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. **Ecography**, v. 38, n. 5, p. 541-545, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- AJIBADE, M. A.; AKHIGBEMEN, A. M.; OKOLIE, N. P.; OZOLUA, R. I. Methanol Leaf Extract of *Paullinia pinnata* Exerts Sleep-Enhancing and Anticonvulsant Effects via a Mechanism Involving the GABAergic Pathway. **Epilepsy Research**, v. 183, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eplepsyres.2022.106943>. Acessado em: 11 fev. 2025.
- ALLEN, B. J.; HILL, D. J.; BURKE, A. M.; CLARK, M.; MARCHANT, R.; STRINGER, L. C.; WILLIAMS, D. R.; LYON, C. Projected future climatic forcing on the global distribution of vegetation types. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 379, 20230011, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0011>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. Assuming the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). **Journal of Applied Ecology**, v. 43, p. 1223-1232, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>. Acessado em: 10 mar. 2025.
- ANDERSON, R. P.; GONZALEZ JÚNIOR, I. Species-specific tuning increases robustness to sampling bias in models of species distributions: an implementation with Maxent. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 15, p. 2796-2811, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.04.011>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- ANDRADE, A. F. A. D.; VELAZCO, S. J. E.; DE MARCO JÚNIOR, P. ENMTML: An R package for a straightforward construction of complex ecological niche models. **Environmental Modelling & Software**, v. 125, p. 104615, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104615>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- ARANTES, L. P.; MACHADO, M. L.; ZAMBERLAN, D. C.; DA SILVEIRA, T. L.; DA SILVA, T. C.; DA CRUZ, I. B. M. *et al.* Mechanisms involved in anti-aging effects of guarana (*Paullinia cupana*) in *Caenorhabditis elegans*. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v. 51, e7552, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1414-431x20187552>. Acessado em: 12 mai. 2025.

ARAUJO, E. C. G.; SILVA, T. C.; CUNHA NETO, E. M.; FAVARIN, J. A. S.; SILVA GOMES, J. K.; CHAGAS, K. P. T.; FIORELLI, E. C.; SONSIN, A. F.; MAIA, E. Bioeconomy in the Amazon: Lessons and gaps from thirty years of non-timber forest products research. **Journal of Environmental Management**, v. 370, 122420, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122420>. Acessado em: 14 jul. 2025.

ASIGBAASE, M. *et al.* Ethnobotanical Study of Medicinal Shrubs and Herbs Used by Forest-Fringe Communities of Ghana. **Wiley Scientifica**, v. 2025, Article ID 1362301, 17 p., 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/sci5/1362301>. Acessado em: 20 mai. 2025.

ATROCH, A. L.; NASCIMENTO FILHO, F. J. Guarana - *Paullinia cupana* Kunth var. *sorbilis* (Mart.) Ducke. In: Exotic Fruits. Academic Press, p. 225-236, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00029-0>. Acessado em: 14 jul. 2025.

AZEVEDO, G. T.; SOUZA, G. L.; LEONARSKI, E.; LOTAS, K. M.; SILVA, G. H. B.; BATISTA, F. R. M. *et al.* Valorization of Guarana (*Paullinia cupana*) Production Chain Waste—A Review of Possible Bioproducts. **Resources**, v. 14, n. 98, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/resources14060098>. Acessado em: 25 out. 2025.

BARRATT, C. D.; ONSTEIN, R. E.; PINSKY, M. L.; STEINFARTZ, S.; KÜHL, H. S.; FORESTER, B. R.; RAZGOUR, O. Life on the edge: A new toolbox for population-level climate change vulnerability assessments. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 15, p. 2038-2058, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14429>. Acessado em: 14 jul. 2025.

BASILE, A.; FERRARA, L.; DEL PEZZO, M.; MELE, G.; SORBO, S.; BASSI, P. *et al.* Antibacterial and antioxidant activities of ethanol extract from *Paullinia cupana* Mart. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 102, p. 32-36, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2005.05.038>. Acessado em: 14 jul. 2025.

BECK, H. T. A survey of the useful species of *Paullinia*. **Advances in Economic Botany**, v. 8, p. 41-56, 1990.

BITTENCOURT, L. D. S.; ZEIDÁN-CHULIÁ, F.; YATSU, F. K. J.; SCHNORR, C. E.; MORESCO, K. S.; KOLLING, E. A. *et al.* Guarana (*Paullinia cupana* Mart.) prevents β -amyloid aggregation, generation of AGEs, and acrolein-induced cytotoxicity on human neuronal-like cells. **Phytotherapy Research**, v. 28, p. 1615-1624, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ptr.5173>. Acessado em: 17 mar. 2025.

BOULTON, C. A.; LENTON, T. M.; BOERS, N. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 3, p. 271-278, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>. Acessado em: 14 jul. 2025.

BRITO, W. B. M.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, F. G.; SILVA, L. S.; CUNHA, J. M.; LIMA, A. F. L.; MARTINS, T. S.; OLIVEIRA, F. P.; OLIVEIRA, I. A. Spatial patterns of magnetic susceptibility optimized by anisotropic correction in different Alisols in southern Amazonas, Brazil. **Precision Agriculture**, v. 23, p. 419-449, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09843-6>. Acessado em: 14 jul. 2025.

CARRILLO-GARCÍA, C.; GIROLA-IGLESIAS, L.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C.; MADRIGAL, J.; MATEO, R. G. Ecological niche models applied to post-megafire vegetation

restoration in the context of climate change. **Science of the Total Environment**, v. 855, 158858, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158858>. Acessado em: 14 jul. 2025.

CARVALHO, C. S.; MACHADO, R. M.; LEMES, M. R.; CARDOSO, D. Ecological Niche Modeling Predicts Alarming Impacts of Global Climate Change on Economically Important Neotropical Trees. **Ecology and Evolution**, v. 15, n. 9, e72105, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ece3.72105>. Acessado em: 14 jul. 2025.

CENTRO DE REFERÊNCIA E INFORMAÇÃO AMBIENTAL (CRIA). SinBiota: sistema de informação ambiental do Programa Biota/FAPESP. 2025. Disponível em: <http://www.biotasp.org.br/sia/>. Acessado em: 20 mar. 2025.

CHERY, J. G.; ACEVEDO-RODRÍGUEZ, P.; ROTHFELS, C. J.; CHELSEA, D.; SPECHT, C. D. Phylogeny of *Paullinia* L. (Paullinieae: Sapindaceae), a diverse genus of lianas with dynamic fruit evolution. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, v. 140, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2019.106577>. Acessado em: 14 jul. 2025.

COHEN, J. Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. **Psychological Bulletin**, v. 70, n. 4, p. 213–220, 1968.

CONAB. Histórico Mensal do Guaraná. 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-Guarana>. Acessado em: 6 mar. 2025.

CONGRETTEL, M.; PINTON, F. Local knowledge, know-how and knowledge mobilized in a globalized world: A new approach of indigenous local ecological knowledge. **People and Nature**, v. 2, n. 3, p. 527–543, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pan3.10142>. Acessado em: 14 jul. 2025.

CORDEIRO, A. L.; TOMAZ, J. S.; BEZERRA, C. S.; MENESES, C. H. S. G.; AGUIAR, A. V.; WREGE, M. S.; RAMOS, S. L. F.; LOPES, R.; FRAXE, T. J. P.; LOPES, M. T. G. Prediction of the Geographic Distribution and Conservation of Amazonian Palm Trees *Astrocaryum acaule* Mart. And *Astrocaryum aculeatum* Mart. *Revista Árvore*, v. 47, e4719, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-908820230000019>. Acessado em: 14 jul. 2025.

COSTA, E. C.; BRAGANÇA, G. P. P.; ARRIOLA, I. A.; FREITAS, M. S. C.; ISAIAS, R. M. S. Host plant traits define the strategies of success to the Cecidomyiidae in a restinga environment. **South African Journal of Botany**, v. 146, p. 1–15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.015>. Acessado em: 25 dez. 2025.

DAO, P. U.; HEUZARD, A. G.; LE, T. X. H.; ZHAO, J.; YIN, R.; SHANG, C.; FAN, C. The impacts of climate change on groundwater quality: A review. *Science of the Total Environment*, v. 912, 169241, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169241>. Acessado em: 14 jul. 2025.

EMPERAIRE, L. The Immateriality of Cultivated Plants in the Context of Rio Negro Region (Brazilian Amazon). In: POCHETTINO, M. L.; CAPPARELLI, A.; STAMPELLA, P. C.; ANDREONI, D. (eds). *Nature(s) in Construction. The Latin American Studies Book Series*.

Cham: Springer, p. 55-64, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-60552-9_4. Acessado em: 14 jul. 2025.

EVANGELISTA-VALE, J. C.; WEIHS, M.; JOSÉ-SILVA, L.; ARRUDA, R.; SANDER, N. L.; GOMIDES, S. C. *et al.* Climate change may affect the future of extractivism in the Brazilian Amazon. **Biological Conservation**, v. 257, p. 109093, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109093>. Acessado em: 14 jul. 2025.

FARIA, M. D. S.; SILVA, N. M. F. D.; BRITO, L. D. A.; SOMNER, G. V. *Paullinieae* (Sapindaceae) of the restingas of Rio de Janeiro, Brazil: taxonomy and distribution. **Biota Neotropica**, v. 22, n. 3, e20221340, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/16760611-BN-2022-1340>. Acessado em: 14 jul. 2025.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>. Acessado em: 14 jul. 2025.

FIELDING, A. H.; BELL, J. F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. **Environmental Conservation**, v. 24, p. 38–49, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>. Acessado em: 14 jul. 2025.

FIRPO, M. A. F.; GUIMARÃES, B. S.; DANTAS, L. G.; SILVA, M. G. B.; ALVES, L. M.; CHADWICK, R. *et al.* Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 4, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.948499>. Acessado em: 11 abr. 2025.

FLORES, B. M.; MONTOYA, E.; SAKSCHEWSKI, B.; NASCIMENTO, N.; STAAL, A.; BETTS, R. A. *et al.* Critical transitions in the Amazon forest system. **Nature**, v. 626, n. 7999, p. 555–564, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07241-3>. Acessado em: 14 jul. 2025.

GAMAGE, A.; GANGAHAGEDARA, R.; GAMAGE, J.; JAYASINGHE, N.; KODIKARA, N.; SURaweera, P.; MERAH, O. Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. **Farming System**, v. 1, p. 100005, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100005>. Acessado em: 14 jul. 2025.

GATTI, L. V.; BASSO, L. S.; MILLER, J. B.; GLOOR, M.; GATTI DOMINGUES, L.; CASSOL, H. L. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 388–393, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>. Acessado em: 14 jul. 2025.

GLOBAL BIODIVERSITY INFORMATION FACILITY (GBIF). Occurrence download. 2025. Disponível em: <https://www.gbif.org/pt/occurrence/search>. Acessado em: 14 jul. 2025.

HACK, B. *et al.* Effect of Guarana (*Paullinia cupana*) on Cognitive Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Nutrients**, v. 15, n. 434, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nu15020434>. Acessado em: 14 out. 2025.

HAMERSKI, L.; SOMNER, G. V.; TAMAIO, N. *Paullinia cupana* Kunth (Sapindaceae): a review of its ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology. **Journal of Medicinal**

Plants Research, v. 7, p. 2221–2229, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/JMPR2013.5067>. Acessado em: 8 abr. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change: the physical science basis. 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acessado em: 14 jul. 2025.

ISRIC – WORLD SOIL INFORMATION. SoilGrids — global gridded soil information. 2024. Disponível em: <https://www.isric.org/explore/soilgrids>. Acessado em: 14 jul. 2025.

IUCN STANDARDS AND PETITIONS COMMITTEE. Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 14. 2019. Disponível em: <https://www.iucnredlist.org/resources/redlistguidelines>. Acessado em: 14 jul. 2025.

JHA, M. K.; DEV, M. Impacts of Climate Change. In: AZROUR, M.; MABROUKI, J.; ALABDULATIF, A.; GUEZZAZ, A.; AMOUNAS, F. (eds.). Smart Internet of Things for Environment and Healthcare. Studies in Computational Intelligence, v. 1165. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 139-159, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70102-3_10. Acessado em: 14 jul. 2025.

KUSTER, V. C.; SILVA, L. C.; MEIRA, R. M. S. A.; AZEVEDO, A. A. Glandular trichomes and laticifers in leaves of *Ipomoea pes-caprae* and *I. imperati* (Convolvulaceae) from coastal Restinga formation: structure and histochemistry. **Brazilian Journal of Botany**, v. 39, p. 1117–1125, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40415-016-0302-5>. Acessado em: 14 jul. 2025.

LAPOLA, D. M.; PINHO, P.; BARLOW, J.; ARAGÃO, L. E.; BERENGUER, E.; CARMENTA, R. *et al.* The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, v. 379, n. 6630, eabp8622, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>. Acessado em: 14 jul. 2025.

LAWLOR, J. A.; COMTE, L.; GRENOUILLET, G.; LENOIR, J.; BAECHER, J. A.; BANDARA, R. M. W. J. *et al.* Mechanisms, detection and impacts of species redistributions under climate change. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 5, p. 351-368, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00527-z>. Acessado em: 14 jul. 2025.

LEPSCH-CUNHA, N.; DOS SANTOS, F.; FRICKMANN, S. Potenciais fitoterápicos nas perspectivas da regulamentação e da pesquisa e desenvolvimento no Brasil com enfoque em plantas medicinais amazônicas. **Revista Fitos**, v. 18, supl. 1, e1478–e1478, 2024. Disponível em: <https://revista.fitos.fiocruz.br/index.php/revista-fitos/article/view/1478>. Acessado em: 14 jul. 2025.

LEROY, B.; DELSOL, R.; HUGUENY, B.; MEYNARD, C. N.; BARHOUMI, C.; BARBET-MASSIN, M.; BELLARD, C. Without quality presence–absence data, discrimination metrics such as TSS can be misleading measures of model performance. **Journal of Biogeography**, v. 45, p. 1994–2002, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jbi.13402>. Acessado em: 14 jul. 2025.

LIMA, A. K. O.; SOUZA, L. M. S.; REIS, G. F.; TAVARES JUNIOR, A. G.; ARAÚJO, V. H. S.; SANTOS, L. C. *et al.* Synthesis of Silver Nanoparticles Using Extracts from Different Parts of the *Paullinia cupana* Kunth Plant: Characterization and In Vitro Antimicrobial Activity.

Pharmaceuticals, v. 17, p. 869, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ph17070869>. Acessado em: 14 jul. 2025.

LU, W. X.; WANG, Z. Z.; HU, X. Y.; RAO, G. Y. Incorporating eco-evolutionary information into species distribution models provides comprehensive predictions of species range shifts under climate change. **Science of the Total Environment**, v. 912, p. 169501, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169501>. Acessado em: 14 jul. 2025.

LUCCHI, E.; TURATI, F.; COLOMBO, B.; SCHITO, E. Climate-responsive design practices: A transdisciplinary methodology for achieving sustainable development goals in cultural and natural heritage. **Journal of Cleaner Production**, v. 457, p. 142431, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142431>. Acessado em: 14 jul. 2025.

LUNGA, K. P.; QIN, X.-J.; YANG, X.-W.; KUIATE, J.-R.; DU, Z.-Z.; GATSING, D. Antimicrobial steroidal saponin and oleanane-type triterpenoid saponins from *Paullinia pinnata*. **BMC Complementary and Alternative Medicine**, v. 14, p. 369, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1472-6882-14-369>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MACDONALD, Z. G.; BENINDE, J.; MATSUNAGA, K.; ZHOU, B.; GILLESPIE, T. W.; BRADLEY SHAFFER, H. Species distribution modeling for conservation science: new predictor layers, reproducible code, and an evaluation of California protected areas. *bioRxiv*, 2025. Disponível em: <https://www.biorxiv.org/>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MAFRA, R. Z.; CUNHA NASCIMENTO, N. M. L.; BONACELLI, M. B. M.; ASSAD, A. L. D.; PORTO, J. I. R.; ANDRADE, G. R. Cadeias de plantas medicinais e fitoterápicos e o potencial do guaraná e da andiroba no estado do Amazonas pela ótica dos atores locais. **Revista Fitos**, v. 19, e1616–e1616, 2025. Disponível em: <https://revista.fitos.fiocruz.br/index.php/revista-fitos/article/view/1616>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MALDANER, D. R.; PELLENZ, N. L.; BARBISAN, F.; AZZOLIN, V. F.; MASTELLA, M. H.; TEIXEIRA, C. F. *et al.* Interaction between low-level laser therapy and guarana (*Paullinia cupana*) extract induces antioxidant, anti-inflammatory, and anti-apoptotic effects and promotes proliferation in dermal fibroblasts. **Journal of Cosmetic Dermatology**, v. 19, p. 629–637, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jocd.13055>. Acessado em: 12 abr. 2025.

MARINHO, E. D. B.; SOMNER, G. V.; MENDONÇA, C. B. F.; GONÇALVES-ESTEVEES, V. Palynotaxonomy of Neotropical species of *Paullinia* L. (Sapindaceae). **Palynology**, v. 49, p. 2428398, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01916122.2024.2428398>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MARINHO, E. D. B.; SOMNER, G. V.; MENDONÇA, C. B. F.; GONÇALVES-ESTEVEES, V. Palynotaxonomy of Neotropical species of *Paullinia* L. (Sapindaceae). **Palynology**, v. 49, n. 2, p. 2428398, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01916122.2024.2428398>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MARQUES, M. J.; BEZERRA, C. S.; TOMAZ, J. S.; LOPES, R.; WREGE, M. S.; AGUIAR, A. V.; RAMOS, S. L. F.; MENESES, C. H. S. G.; FRAXE, T. J. P.; LOPES, M. T. G. Predição de distribuição geográfica e modelagem de nicho ecológico de açaizeiros na Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, e78108, 2024. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/78108>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MARQUES, L. L. M.; FERREIRA, E. D. F.; DE PAULA, M. N.; KLEIN, T.; DE MELLO, J. C. P. *Paullinia cupana*: A multipurpose plant—A review. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 29, p. 77–110, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bjp.2018.08.007>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MARTINS, I. S. S.; VASCONCELLOS, A. G. A Relação entre o Regulamento de Uso das Indicações Geográficas e o Conhecimento Tradicional: o caso do guaraná envolvendo os territórios de Maués e da Terra Indígena Andirá-Marau. **Cadernos de Prospecção**, v. 13, p. 293, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.9771/cp.v13i1.29829>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MBELEBELE, Z.; MDODA, L.; NTLANGA, S. S.; NONTU, Y.; GIDI, L. S. Harmonizing traditional knowledge with environmental preservation: Sustainable strategies for the conservation of indigenous medicinal plants (IMPs) and their implications for economic well-being. **Sustainability**, v. 16, p. 5841, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16145841>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MCLELLAN, T. M.; CALDWELL, J. A.; LIEBERMAN, H. R. A review of caffeine's effects on cognitive, physical and occupational performance. **Neuroscience and Biobehavioral Reviews**, v. 71, p. 294–312, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.09.001>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MEDEIROS, H.; ACEVEDO-RODRÍGUEZ, P.; DE CARVALHO LOPES, J.; FORZZA, R. C. Taxonomic revision and phylogenetic relationships of *Thinouia* (Sapindaceae), a neotropical genus. **PhytoKeys**, v. 252, p. 207, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3897/phytokeys.252.116864>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MONDAL, S.; PALIT, D. Challenges in natural resource management for ecological sustainability. In: *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability*. [S.l.]: Elsevier, p. 29-59, 2022.

MONTEVERDE, C.; DE SALES, F.; JONES, C. Evaluation of the CMIP6 performance in simulating precipitation in the Amazon River Basin. **Climate**, v. 10, n. 8, p. 122, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cli10080122>. Acessado em: 14 jul. 2025.

MORETTO, S. P. Guaraná: How Brazil Embraced the World's Most Caffeine-Rich Plant. **Agricultural History**, v. 98, p. 284-285, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1215/00021482-11058500>. Acessado em: 14 jul. 2025.

NAFIU, M. O.; OKUNLADE, A. F.; YEKEEN, A. A.; SALAWU, M. O. Polyphenolic extract of *Paullinia pinnata* leaf exhibits antidiabetic, antihyperlipidaemic and antioxidant activities in alloxan-induced diabetic rats. **Population**, v. 12, p. 13, 2018.

NASCIMENTO, A. P.; COSTA NETO, P. Q.; ALMEIDA, L. N.; VIEIRA, L. F. S.; MATOS, W. A.; FERREIRA, C. C. *et al.* Guarana propagation strategies: a review. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, e275940, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.275940>. Acessado em: 14 jul. 2025.

NETO, I. L. C. N.; MARTINS, F. M.; SOMNER, G. V.; TAMAIO, N. Secretory structures in stems of five lianas of *Paullinieae* (Sapindaceae): morphology and histochemistry. **Flora**, v. 235, p. 29–40, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.06.006>. Acessado em: 14 jul. 2025.

NIX, H. A. A biogeographic analysis of Australian elapid snakes. In: LONGMORE, R. (ed.). Atlas of Elapid Snakes of Australia. Canberra: Australian Government Publishing Service, p. 4–15, 1986.

OGWU, M. C.; OSAWARU, M. E. Traditional methods of plant conservation for sustainable utilization and development. In: Biodiversity in Africa: potentials, threats and conservation. Singapore: Springer Nature Singapore, p. 451–472, 2022.

OLATUJOYE, F.; BAMIGBADE, O.; OYEDEJI, O.; IDOWU, T.; OLUDURO, A. Evaluation of antibacterial, phytochemical screening and GCMS profile of *Paullinia pinnata* Linn. leaf extracts against clinical wound isolates. **Ife Journal of Science**, v. 26, p. 245–258, 2024.

PANIZZA, A. M.; FERRUCCI, M. S.; TEMPONI, L. G.; CAXAMBU, M. G.; LIMA, L. C. P. Taxonomic synopsis of Sapindaceae in the Upper Paraná Atlantic Forest. **Rodriguésia**, v. 75, e01822023, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-786020247501822023>. Acessado em: 14 jul. 2025.

PIMENTEL, R. R.; ROCHA, J. F.; OLIVEIRA ARRUDA, R. D. C.; SOMNER, G. V. Morfoanatomia e Histoquímica de três espécies de *Paullinia* L. (Sapindaceae). **Revista Fitos**, v. 17, n. 4, p. 479–489, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.32712/2446-4775.2023.1320>. Acessado em: 14 jul. 2025.

PINHO, L. S.; SILVA, M. P.; THOMAZINI, M.; COOPERSTONE, J. L.; CAMPANELLA, O. H.; COSTA RODRIGUES, C. E.; FAVARO-TRINDADE, C. S. Guaraná (*Paullinia cupana*) by-product as a source of bioactive compounds and as a natural antioxidant for food applications. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, e15854, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfpp.15854>. Acessado em: 14 jul. 2025.

PINTO, K. G. D.; PARÉDIO, R. F.; ATROCH, A. L.; FILHO, F. J. D. N.; LEITE, N. R. D. C.; KONRAD, B. N. L.; ALBERTINO, S. M. F. Rooting Conditions for Production of Guarana Clonal Seedlings. **Horticulturae**, v. 10, p. 1169, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10111169>. Acessado em: 14 jul. 2025.

POMPORTES, L.; DAVRANCHE, K.; BRISSWALTER, I.; HAYS, A.; BRISSWALTER, J. Heart Rate Variability and Cognitive Function Following a Multi-Vitamin and Mineral Supplementation with Added Guarana (*Paullinia cupana*). **Nutrients**, v. 7, p. 196–208, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nu7010196>. Acessado em: 14 jul. 2025.

PRASAD, A. M.; IVERSON, L. R.; LIAW, A. Newer Classification and Regression Tree Techniques: Bagging and Random Forests for Ecological Prediction. **Ecosystems**, v. 9, p. 181–199, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0054-1>. Acessado em: 14 jul. 2025.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acessado em: 14 jul. 2025.

R CORE TEAM. RStudio: Integrated Development Environment for R. Boston: Posit Software, PBC, 2024. Disponível em: <http://www.posit.co/>. Acessado em: 20 jul. 2025.

- RAIHAN, A. A review of agroforestry as a sustainable and resilient agriculture. **Journal of Agriculture Sustainability and Environment**, v. 2, p. 49-72, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.56556/jase.v2i1.799>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- RAMOS, M. V.; DEMARCO, D.; SOUZA, I. C. C.; FREIRAS, C. D. T. Laticifers, latex, and their role in plant defense. **Trends in Plant Science**, v. 24, p. 553–567, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.02.002>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- ROCHA, C. A. M.; SANTANA, G. M.; SANTOS, H. M.; JESUS, R. M.; LÔBO, I. P. Comprehensive evaluation of methylxanthines and phenolic compounds in Bahia's guarana (*Paullinia cupana*), Brazil: implications for variety selection and by-product utilization. **Food Science and Technology**, v. 44, e00064, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/fst.00064>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- SALGOTRA, R. K.; CHAUHAN, B. S. Genetic diversity, conservation, and utilization of plant genetic resources. **Genes**, v. 14, p. 174, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/genes14010174>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- SANTANA, Á. L.; MACEDO, G. A. Effects of hydroalcoholic and enzyme-assisted extraction processes on the recovery of catechins and methylxanthines from crude and waste seeds of guarana (*Paullinia cupana*). **Food Chemistry**, v. 281, p. 222–230, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.086>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- SARATH, P.; PARVEEN, A. B. M.; VBS; DASGUPTA, M. G.; HR, B.; DEV, S. A. Genetic diversity and population structure of threatened Calamus species in India: implications for In-situ and Ex-situ conservation. **Tree Genetics & Genomes**, v. 20, p. 39, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11295-024-01671-9>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- SARMA, H. H.; PAUL, A.; KAKOTI, M.; TALUKDAR, N.; HAZARIKA, P. Climate resilient agricultural strategies for enhanced sustainability and food security: A review. **Plant Archives**, v. 24, p. 787-792, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2024.v24.no.1.108>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- SCHIMPL, F. C.; DA SILVA, J. F.; GONÇALVES, J. F. D. C.; MAZZAFERA, P. Guarana: Revisiting a highly caffeinated plant from the Amazon. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 150, p. 14–31, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.08.007>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- SCHOEMAN, D. S.; GUPTA, A. S.; HARRISON, C. S.; EVERETT, J. D.; BRITO-MORALES, I.; HANNAH, L. *et al.* Demystifying global climate models for use in the life sciences. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 38, p. 843-858, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.04.005>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- SELWOOD, K. E.; ZIMMER, H. C. Refuges for biodiversity conservation: A review of the evidence. **Biological Conservation**, v. 245, p. 108502, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108502>. Acessado em: 14 jul. 2025.
- SHIVANNA, K. R. Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. **Proceedings of the Indian National Science Academy**, v. 88, p. 160-171, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43538-022-00073-6>. Acessado em: 14 jul. 2025.

SILVA, A. C. D. C.; OLIVEIRA, D. M. D.; GOMES, L. J. What does the list of Brazilian sociobiodiversity species of food value show us?. **Rodriguésia**, v. 73, e00472021, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-7860202273059>. Acessado em: 14 jul. 2025.

SILVA, D. S.; ARIMA, E. Y. Sustainability Consequences of Making Land Change Decisions Based on Current Climatology in the Brazilian Cerrados. **Land**, v. 12, p. 914, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land12040914>. Acessado em: 14 jul. 2025.

SILVA, L. N.; OLIVEIRA, E. C.; BARATTO, L. C. Amazonian useful plants described in the book “Le Pays des Amazones” (1885) of the Brazilian propagandist Baron de Santa-Anna Nery: a historical and ethnobotanical perspective. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 20, n. 1, p. 26, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13002-024-00663-2>. Acessado em: 14 jul. 2025.

SIRENA, D. H. *et al.* Guarana (*Paullinia cupana*) as a potential tool for mesenchymal stromal cells priming in regenerative medicine. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v. 57, e13286, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1414-431X2024e13286>. Acessado em: 5 jan. 2025.

SOLIANI, C.; CECCARELLI, V.; LANTSCHNER, M. V.; THOMAS, E.; MARCHELLI, P. Predicting the distribution of plant species from southern South America: are the hotspots of genetic diversity threatened by climate change?. **Biodiversity and Conservation**, v. 33, p. 725-757, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02770-0>. Acessado em: 14 jul. 2025.

SOMNER, G. V.; MEDEIROS, H. *Paullinia* in Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB20914>. Acessado em: 3 set. 2025.

SOUSA, N. S. O.; SOUZA, E. S.; CANTO, E. S. M.; SILVA, J. P. A.; CARNEIRO, L. M.; FRANCO-DE-SÁ, J. F. O.; SOUZA, J. V. B. Amazonian fermentations: an analysis of industrial and social technology as tools for the development of bioeconomy in the region. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, e276493, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.276493>. Acessado em: 14 jul. 2025.

TAN, X.; WU, X.; HUANG, Z.; FU, J.; DENG, S.; LIU, Y.; GAN, T. Y.; LIU, B. Increasing global precipitation whiplash due to anthropogenic greenhouse gas emissions. **Nature Communications**, v. 14, p. 1-15, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38510-9>. Acessado em: 14 jul. 2025.

TORRES, E. A.; PINAFFI-LANGLEY, A. C. D. C.; FIGUEIRA, M. D. S.; CORDEIRO, K. S.; NEGRÃO, L. D.; SOARES, M. J. *et al.* Effects of the consumption of guarana on human health: A narrative review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 21, p. 272-295, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12862>. Acessado em: 14 jul. 2025.

VASCONCELOS, R. N.; CANTILLO-PÉREZ, T.; FRANCA ROCHA, W. J.; AGUIAR, W. M.; MENDES, D. T.; JESUS, T. B. *et al.* Advances and Challenges in Species Ecological Niche Modeling: A Mixed Review. **Earth**, v. 5, n. 4, p. 963-989, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/earth5040055>. Acessado em: 14 jul. 2025.

WANI, Z. A.; DAR, J. A.; LONE, A. N.; PANT, S.; SIDDIQUI, S. Habitat suitability modelling and range change dynamics of *Bergenia stracheyi* under projected climate change scenarios. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 13, p. 1561640, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fevo.2025.1561640>. Acessado em: 14 jul. 2025.

WEIL, A. G.; WITKOSKI, A. C. A. A organização ancestral do trabalho na produção do guaraná em Maués/Amazonas. **Acta Scientiarum Human and Social Sciences**, v. 45, e69245, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actascihumansoc.v45i1.69245>. Acessado em: 14 jul. 2025.

WICKHAM, H.; WICKHAM, M. H. Package tidyverse: Easily install and load the “Tidyverse”. 2017. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=tidyverse>. Acessado em: 14 jul. 2025.

WU, H.; YU, L.; SHEN, X.; HUA, F.; MA, K. Maximizing the potential of protected areas for biodiversity conservation, climate refuge and carbon storage in the face of climate change: A case study of Southwest China. **Biological Conservation**, v. 284, p. 110213, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110213>. Acessado em: 14 jul. 2025.

YAMAGUCHI, K. K. D. L.; SOUZA, A. D. O. Antioxidant, hypoglycemic and neuroprotective activities of extracts from fruits native to the Amazon region: A review. **Biotechnology Journal International**, v. 24, p. 9-31, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/bji/2020/v24i630119>. Acessado em: 14 jul. 2025.

YU, D.; HUANG, T.; TIAN, B.; ZHAN, J. Advances in Biosynthesis and Biological Functions of Proanthocyanidins in Horticultural Plants. **Foods**, v. 9, n. 12, p. 1774, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods9121774>. Acessado em: 14 jul. 2025.

ZOBEL, M.; KOOREM, K.; MOORA, M.; SEMCHENKO, M.; DAVISON, J. Plasticidade simbiote como um impulsionador do sucesso da planta. **New Phytologist**, v. 241, p. 2340-2352, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.19566>. Acessado em: 14 jul. 2025.

ZURELL, D.; FRITZ, S. A.; RÖNNFELDT, A.; STEINBAUER, M. J. Predicting extinctions with species distribution models. *Cambridge Prisms: Extinction*, v. 1, e8, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/ext.2023.8>. Acessado em: 14 jul. 2025.