



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

JOÃO GABRIEL LEAL MARTINS

**Distúrbios climáticos do antropoceno afetam negativamente o manejo florestal na
Caatinga: estudo de caso com *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm.**

FORTALEZA

2022

JOÃO GABRIEL LEAL MARTINS

Distúrbios climáticos do antropoceno afetam negativamente o manejo florestal na Caatinga:
estudo de caso com *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Ciências Biológicas do Centro
de Ciências da Universidade Federal do
Ceará, como um dos requisitos à obtenção do
título de Bacharel em Ciências Biológicas

Orientadora: Francisca Soares de Araújo
Coorientador: Peter Stoltenborg Groenendyk

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M343d Martins, João Gabriel Leal.

Distúrbios climáticos do antropoceno afetam negativamente o manejo florestal na Caatinga : estudo de caso com *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm / João Gabriel Leal Martins. – 2022.
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Ciências Biológicas, Fortaleza, 2022.

Orientação: Profa. Dra. Francisca Soares de Araújo.

Coorientação: Prof. Dr. Peter Stoltenborg Groenendyk.

1. Dendrocronologia. 2. Relação Clima-Crescimento Vegetal. 3. Mudanças Climáticas. 4. Talhadia Em Árvores. I. Título.

CDD 570

JOÃO GABRIEL LEAL MARTINS

Distúrbios climáticos do antropoceno afetam negativamente o manejo florestal na Caatinga:
estudo de caso com *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Ciências Biológicas do Centro
de Ciências da Universidade Federal do
Ceará, como um dos requisitos à obtenção do
título de Bacharel em Ciências Biológicas

Orientadora: Francisca Soares de Araújo
Coorientador: Peter Stoltenborg Groenendyk

Aprovado em: 13/12/2022

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Francisca Soares de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Anna Abrahão
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cleiton Breder Eller
Universidade Federal do Ceará (UFC)

FORTALEZA

2022

Aos meus pais e aos meus avós, cada um de vocês me mostrou uma face diferente do mundo e me mostrou as diferentes formas de existir nele.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de Iniciação Científica que encorajou a dedicação ao Projeto de Pesquisa e a operacionalização do estudo.

Aos meus pais, João Vianey e Carla Maria, por me darem não apenas a vida (literalmente) como o amor incondicional e as condições necessárias para que eu me tornasse a melhor versão de mim mesmo. Por cada livro, viagem, brincadeira e conversa, cada uma dessas coisas me deixou uma marca indelével.

Aos meus avós: João Carlos e Maria Wélia (*in memoriam*), por tudo o que me deram na vida, mesmo que só tenha restado a saudade e a gratidão, e principalmente à minha vizinha Maria Auxiliadora, a melhor pessoa que eu já conheci e justamente aquela que me ensinou sobre amor pelas coisas da natureza; sobretudo, aquilo que é belo e inefável.

Ao restante dos meus familiares que também foram importantes para minha formação: Valquíria e Roberta, minhas irmãs; Givana, minha madrastra; Marcelo, Fátima e Bosco, meus tios; Lucas, Emanuel, Isadora, Márcio e Marcelo, meus primos.

À professora Dra. Francisca Soares de Araújo pelos anos de orientação no laboratório; pelos sucessivos projetos de pesquisa; pela abertura ao meu “jeitinho”; e, principalmente, pela paciência e disposição de me ensinar tudo o que ela aprendeu ao longo da vida sobre fazer ciência de qualidade.

Ao professor Dr. Peter Stoltenborg Groenendijk pelos momentos agradáveis de aprendizado; pelos *insights*; pela ajuda com a Dendrocronologia, da escolha das árvores até o último mapa e (muitas) linhas de código; e, claro, pelos gracejos; tudo igualmente fundamental para a composição deste trabalho.

Aos demais professores com quem interagi e que também contribuíram com informações importantes para o trabalho e para a minha formação, notadamente: Profa. Arlete Aparecida Soares; Profa. Lígia Queiroz Matias; Prof. Lorenzo Roberto Sgobaro Zanette e Prof. Rafael Carvalho da Costa, do Departamento de Biologia, bem como aos Prof. Lamartine Soares Cardoso de Oliveira, do Departamento de Fitotecnia.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Fitogeografia da UFC: Bruno Menezes pelo apoio fundamental neste trabalho e em todos os que fiz como membro do laboratório; Carlos Eduardo pelo apoio, pelas brincadeiras em laboratório e pela ajuda na escrita e na produção do mapa em QGIS; Darlane de Freitas pela companhia, pelo suporte na escrita e no

processamento das amostras e por me convidar pro seu casamento (mesmo que eu não tenha podido ir); Natan, pela amizade durante a bolsa e por me convencer a ver Euforia.

Aos meus amigos e (espero) futuros colegas do Dendrolab da Unicamp Vitor e Beto, a experiência com a Dendrocronologia, a disposição e o bom humor (mesmo com o carro dando prego no meio do nada) de vocês foi essencial.

Aos mateiros, ambos sujeitos absolutamente ímpares: Seu Chaguinha, o mago da lima, e ao Zé Gaudêncio que foi fundamental quando todos os planos B tinham dado errado.

Aos servidores e brigadistas do ICMBio pelo árduo e bravo trabalho na manutenção e zelo das Unidades de Conservação.

Aos funcionários da UFC (principalmente os do Restaurante Universitário) pelo trabalho sem o qual a Universidade simplesmente não funcionaria e, portanto, eu não poderia me formar.

À minha terapeuta.

À Benilda e ao seu marido, que nos receberam muito bem em sua casa depois dos dias cansativos de campo. Obrigado pelo carinho, pelas conversas e pela comida deliciosa.

Aos meus amigos que entraram no curso comigo em 2018.1, os “Cornos”: Alanna, Alfredo, Igor, Matheus, Milena, Sabrina, Estefane, Jonathas, Lorena e Renan; vocês sempre serão parte MUITO importante do que me fez chegar até aqui.

Aos meus amigos mais queridos, Matheus, Alanna, Thalita, Yuri, Mabelle, Tainá, Melissa, Renan, Lygia e Davi. Eu precisaria de um outro TCC para agradecer a vocês do jeito certo. Obrigado pela amizade, pelo apoio, pela parceria, pelos bons momentos e até pelas brigas.

À minha namorada, Maria Eduarda, por chegar de maneira inesperada, mas muito agradável, na minha vida e por me trazer constantemente à tranquilidade, espero terminar logo esse trabalho pra ir ficar com você.

E, finalmente, a todos os membros dos projetos que integrei durante a graduação, principalmente o Inflora e a Mata Branca, espaços nos quais pude desenvolver habilidades imprescindíveis para a execução desse trabalho, para a minha formação profissional e pessoal e, também, onde conheci pessoas incríveis.

“Quando deixamos as árvores resolverem um problema, ele acaba ” Peter Wohlleben

RESUMO

As principais variáveis climáticas com tendência de mudanças devido ao aquecimento global são: a frequência de eventos de ENSO, a precipitação, e a temperatura média do planeta. Os dois últimos fatores apresentam forte correlação com o incremento anual de biomassa vegetal. Todos esses parâmetros indicam tendências negativas para o crescimento vegetal nas zonas tropicais a curto e médio prazo, inclusive no semiárido do Nordeste brasileiro. Compreender os efeitos das flutuações climáticas nas árvores da Caatinga auxiliará na tomada de decisões para mitigar a ação combinada dos distúrbios climáticos e antropogênicos na sustentabilidade do manejo florestal. Métodos de manejo como a talhadia são tradicionalmente aplicados para acelerar o incremento de biomassa em sistemas florestais. No entanto, estudos de longo prazo para verificar efeito das mudanças climáticas no manejo florestal demandam tempo e dinheiro. Alternativamente, investigações através da dendrocronologia são eficazes para detectar relações entre o clima e o crescimento de árvores. Diante do exposto, visamos conhecer, através da dendrocronologia, os efeitos dos distúrbios climáticos no crescimento de populações naturais não-talhadas e manejadas por talhadia em *Amburana cearensis* na Caatinga do estado do Ceará, uma das áreas mais secas do Nordeste brasileiro. Encontramos forte correlação negativa da TSM do oceano pacífico equatorial oriental (região associada a fenômenos de ENSO) e da temperatura máxima terrestre na área de estudo com o crescimento da espécie estudada. Houve forte correlação positiva entre precipitação na área de estudo com o incremento de biomassa das árvores. O crescimento de indivíduos crescidos a partir da talhadia foi mais rápido do que o de indivíduos não-talhados. O fato das árvores não-talhadas e talhadas demonstrarem sensibilidade climática similar no incremento anual de biomassa reflete o quanto as populações naturais desta espécie estarão vulneráveis às mudanças climáticas em curso no semiárido brasileiro. Isso permite inferir também que o aceleração de crescimento ocasionado pela talhadia em florestas comerciais se estende para a aplicação no manejo sustentável de populações naturais da Caatinga. A dendrocronologia de árvores talhadas e não-talhadas, também pode subsidiar ações de manejo contextualizadas para as mudanças climáticas, visto que o incremento anual de biomassa vai depender da frequência de eventos de El Niño, que tende a aumentar, prejudicando o crescimento vegetal. Ambas as populações, talhadas e não talhadas, serão negativamente afetadas pelas mudanças climáticas, que afetarão boa parte do alcance de ocorrência da espécie.

Palavras-chave: dendrocronologia, relação clima-crescimento vegetal, mudanças climáticas, talhadia em árvores

ABSTRACT

The main climate variables that show a tendency to change due to global warming are: the frequency of ENSO events, precipitation, and the average temperature of the planet. The last two factors are strongly correlated with the annual increment of plant biomass. All of these parameters point towards negative trends for plant growth in tropical zones in the short and medium term, including in the semi-arid region of the Brazilian Northeast. Understanding the effects of climate fluctuations on Caatinga trees will help in decision-making aimed to mitigate the combined action of climate and anthropogenic disturbances on the sustainability of forest management. Management methods such as coppicing are traditionally applied to accelerate the increase of biomass in forest systems. However, long-term studies to verify the effect of climate change on forest management demand time and money. Alternatively, investigations through dendrochronology are effective in detecting relationships between climate and tree growth. In aforementioned, we aim to understand, through dendrochronology, the effects of climate disturbances on the growth of natural populations of non-coppice vs. coppice trees of *Amburana cearensis* in the Caatinga of the state of Ceará, one of the driest areas in the Brazilian Northeast. We found a strong negative correlation between the SST of the eastern equatorial Pacific Ocean (a region associated with ENSO phenomena) and the maximum terrestrial temperature in the study area with the growth of the studied species. There was a strong positive correlation between precipitation in the study area and the increment of tree biomass. The growth of individuals grown from coppice was faster than that of non-coppice individuals. The fact that both coppice and non-coppice trees demonstrate climate sensitivity in the annual increment of biomass reflects how vulnerable the natural populations of this species are to the ongoing climate changes in the Brazilian semi-arid region. This also allows us to infer that the acceleration of growth caused by coppice in commercial forests extends to the application in the sustainable management of natural populations of the Caatinga. The dendrochronology of coppice and non-coppice trees can also support the definition of more updated management plans, since the annual diametric growth will depend on the frequency of El Niño events, which tend to increase, harming plant growth. Both coppice and non-coppice populations will be negatively affected by climate change, which will affect most of the species distribution range.

Key-words: dendrochronology; plant climate-growth correlation; climate change; tree coppice.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Mapa das zonas Niño 1, 2, 3 e 3.4 e de correlação espacial entre TSM e crescimento vegetal, baseado em amostras coletadas de populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 44
- Figura 2 - Mapa do Brasil, com destaque para a Caatinga, para o Ceará, para a ESEC de Aiuaba e para os pontos de coleta de *Amburana cearensis* 45
- Figura 3 – Indivíduo de *Amburana cearensis* crescido após talhadia Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 46
- Figura 4 - Árvore não-talhada de *Amburana cearensis*, Estação Ecológica de Aiuaba, município de Aiuaba, Ceará Brasil 47
- Figura 5 - Detalhes da vista frontal da broca utilizada para a coleta de amostras em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 48
- Figura 6 - Amostra dendrocronológica coletada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 48
- Figura 7 - Coleta de amostra dendrocronológica na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 49
- Figura 8 - Amostra fixada coletada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 49
- Figura 9 - Ficha de coleta Dendrocronológica para Silvicultura 50
- Figura 10 - Vista frontal da amostra lixada no suporte de coleta realizada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 50
- Figura 11 - Amostra da vista transversal do caule coletada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 51
- Figura 12 - Imagem produzida com a scanner a partir da amostra coletada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 51
- Figura 13 - Detalhes das estruturas indicadores de anel de crescimento da amostra escaneada resultante da coleta em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 51
- Figura 14 - Diferenças diâmetro/idade do tronco principal dos indivíduos amostrados em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 52
- Figura 15 - Diferenças diâmetro/idade de todos os troncos dos indivíduos amostrados de populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 52
- Figura 16 - Mapa de correlação espacial entre precipitação e crescimento vegetal de populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 53
- Figura 17 - Distribuição mensal média das chuvas na sede da Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 54

Figura 18 – Mapa de correlação espacial entre temperatura máxima na estação chuvosa e crescimento vegetal, baseado em amostras coletadas de populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil 55

Figura 19 - Mapa da Área de Ocorrência de *A. cearensis* na América do Sul baseado em dados do GBIF (<https://www.gbif.org/species/2945821>) 56

Figura 20 - Gráficos de regressões lineares mostrando as correlações entre o RWI e as variáveis climáticas sob análise (precipitação, à esquerda; índice de El Niño, ao centro e temperatura máxima, à direita). 56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DMC - Diâmetro Mínimo de Corte

ENSO - *El Niño South Oscillation* (El Niño Oscilação Sul)

ESEC - Estação Ecológica

FTSS - Floresta Tropical Sazonalmente Seca

GOL - *Growth-Oriented Logging*

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LM - *Linear Model*

RWI - *Ring Width Index* (Índice de largura do anel)

SDTF - *Seasonally Dry Tropical Forest*

SST - *Sea Surface Temperature*

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

UC - Unidade de Conservação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. MATERIAL E MÉTODOS	21
2.1. Espécie-modelo	21
2.2. Local do estudo	21
2.3. Critérios de inclusão e amostragem dendrocronológica	22
2.4. Amostragem dendrocronológica não-destrutiva	23
2.5. Preparo e escaneamento das amostras.	24
2.6. Datação e mensuração dos anéis das amostras e checagem preliminar	26
2.6.1. CooRecorder	26
2.6.2. CDendro	27
2.6.3. COFECHA	27
2.7. Análises estatísticas no R	28
2.8. Testes das hipóteses	29
2.9. Elaboração dos gráficos e mapas	30
3. RESULTADOS	32
3.1. O crescimento foi sincronizado com as variáveis climáticas analisadas	32
3.2. Não houve diferenças de sensibilidade climáticas entre talhadas e não-talhadas	32
3.3. Árvores talhadas crescem mais rápido em diâmetro	32
3.4. Mudanças climáticas mostram tendência de distúrbios em amplas áreas	33
4. DISCUSSÃO	34
4.1. Sincronia entre variáveis climáticas e crescimento diamétrico	34
4.2. Sensibilidade similar entre diferentes grupos de manejo	34
4.3. Crescimento diamétrico acelerado em árvores talhadas	36
4.4. Outras aplicações possíveis para os dados	37
5. CONCLUSÃO	38
6. REFERÊNCIAS	39
7. ANEXOS	62

1. INTRODUÇÃO

Desde 1990, os Relatórios de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (em inglês, *IPCC*) discutem o cenário climático global e suas tendências, causas, efeitos e interações com as alterações do ciclo do carbono entre as regiões do mundo para a vida na terra (IPCC, 2014; MARENGO, 2014 e 2007). A principal causa indicada para as mudanças climáticas é o conjunto de alterações antropogênicas nos ciclos de carbono e as consequências variam entre as regiões do mundo (IPCC, 2014). Dentre os efeitos esperados com as mudanças climáticas estão: aumento da temperatura média, diminuição da precipitação e aumento da frequência de eventos climáticos extremos; todos esses efeitos geram distúrbios negativos para o crescimento vegetal (BRIENEN, 2010; WANG, 2017).

Espera-se que eventos de La Niña e de El Niño (abarcados pelo termo ENSO, *El Niño South Oscillation*) e seus fenômenos relacionados aumentem de frequência (COLLINS, 2010). ENSO são alterações periódicas do sistema oceano-atmosfera onde a modificação da intensidade dos ventos alísios acarreta em variações na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na faixa equatorial do oceano pacífico oriental (WANG, 2017). Essa região do oceano, usada para diagnóstico de formação de ENSO, é dividida em Niño 1, 2, 3 e 3.4 (Figura 1) (BUNGE, 2009; MCPHADEN, 1999). El Niño é caracterizado por TSM acima da média nas áreas diagnósticas de Niño, enquanto La Niña se caracteriza por TSM abaixo da média nas mesmas áreas (WANG, 2017). Em suma, a TSM nas áreas de Niño 1, 2, 3 e 3.4 nos meses de formação e início de consolidação do fenômeno (Novembro a Maio) é estabelecida como parâmetro para avaliar a ocorrência e a intensidade dos eventos ENSO (WANG, 2017; BUNGE, 2009; MCPHADEN, 1999; IPCC, 2014).

A formação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um evento fortemente afetado em anos de ENSO de modo que em anos de El Niño, a formação da ZCIT é prejudicada em razão das anomalias com os ventos Alísios (LINDZEN, 1987). A ZCIT é um dos principais sistemas meteorológicos que favorecem a precipitação na quadra chuvosa da região Setentrional do Nordeste semiárido brasileiro (PEREIRA, 2014; LINDZEN, 1987), cuja vegetação dominante é a Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS) (MORO et al., 2016). Assim, em anos de El Niño, o semiárido brasileiro costuma passar por maior estresse hídrico, portanto, o aumento da frequência de El Niño trará um aumento do estresse hídrico na região que impactará negativamente o crescimento vegetal da FTSS situada na região (TORRES, 2017; PEREIRA, 2014).

As Florestas Tropicais são fundamentais reguladoras climáticas, provêm múltiplos serviços ecossistêmicos, sobretudo, são sumidouros de Carbono (XU, 2021; POORTER, 2016). Dentre as florestas tropicais, as FTSS, por sua sazonalidade e grande extensão, também se destacam como importantes moduladores do ciclo intra-anual de carbono (PIAO, 2020). No domínio fitogeográfico da Caatinga (MORO et al., 2016), a vegetação está entre as mais vulneráveis às mudanças climáticas (TORRES, 2017). Essa vulnerabilidade, se deve às previsões de aumento da temperatura média, ao aumento da frequência de eventos ENSO e à diminuição da precipitação média anual (ARAGÃO, 2022; SOUZA, 2015; DE OLIVEIRA SANTOS, 2017; FERREIRA, 2017). As FTSS anualmente estão submetidas a uma estação de estresse hídrico e periodicamente passam por anos consecutivos de precipitação muito reduzida, mesmo na estação chuvosa (DIRZO, 2011). Esses anos de estiagem estão relacionados à ocorrência de El Niño (IPCC, 2014). Dessa forma, conforme já destacado por Aragão et al. (2022), conhecer os impactos das mudanças climáticas sobre a flora do Domínio Fitogeográfico da Caatinga através de *proxies* que possibilitem avaliar as relações clima-crescimento vegetal nesses ambientes, como por exemplo a dendrocronologia, é fundamental para mitigar as futuras consequências negativas.

A Dendrocronologia é o estudo dos anéis anuais de crescimento em árvores, apresenta uma literatura robusta e é bem estabelecida como método para avaliar relações clima-crescimento vegetal nas Zonas Temperadas (SPEER, 2012; FRITTS, 2001). A variável mais utilizada nesse estudo é o índice de largura de anel (em inglês, *ring width index, RWI*), um índice padronizado de média 1 que representa a variação interanual de crescimento das árvores (SPEER, 2012). Mais recentemente, esses métodos também vêm sendo aplicados a árvores tropicais, especialmente em árvores sob climas sazonais, porque também tendem a formar anéis anuais de crescimento (BRIENEN, 2005; WILS, 2010; ZUIDEMA, 2022; LÓPEZ, 2016; LÓPEZ, 2022). O estudo de Zuidema e colaboradores (2022) compilou dados de várias árvores de florestas tropicais e mostra correlação do crescimento negativa com temperatura máxima na estação seca e positiva com a precipitação. Destarte, as oscilações dessas duas variáveis mostram-se determinante para as variações interanuais de crescimento das árvores nesse tipo de ambiente.

Mesmo com o aumento dos estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas nas florestas tropicais (ZUIDEMA et al, 2022), ainda há lacuna de dados para FTSS, especialmente no Domínio Fitogeográfico da Caatinga, onde destacamos o trabalho de Aragão et al (2022). Além disso, com exceção de Aragão et al. (2022) e de Brienem (2010), geralmente esses estudos abordam apenas a relação precipitação e temperatura em terra, mas

não a relação com TSM em áreas oceânicas com efeitos sobre as condições em terra nas áreas de coleta. Portanto, é necessário investigar mais a fundo as relações clima-crescimento vegetal incluindo a variável de TSM nas áreas de diagnóstico de ENSO (ARAGÃO, 2022).

Trabalhos já realizados *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm nas matas secas da Bolívia (LÓPEZ, 2022; LÓPEZ, 2016; BRIENEN, 2005) e nas regiões mais meridionais do semiárido (GODOY-VEIGA, 2021) demonstram que essa espécie forma anéis anuais de crescimento e apresenta forte correlação de precipitação e de temperatura com crescimento vegetal (LÓPEZ, 2016, 2022; GODOY-VEIGA, 2021; BRIENEN, 2005). Essa característica faz *A. cearensis* ser uma boa espécie-modelo para testarmos os efeitos das mudanças climáticas em área sob forte influência do fenômeno El Niño usando as relações já conhecidas de crescimento com precipitação e temperatura como base de comparação. Adicionalmente, é necessário levar em conta os possíveis impactos do manejo na relação clima-crescimento dessa espécie.

A talhadia é um dos métodos tradicionais de manejo florestal devido à alta capacidade regenerativa de muitas espécies de árvores de produzir novos troncos a partir do toco e raízes remanescentes após corte raso (FULLER, 1993; HAUSRATH, 1982). Esse método tem sido aplicado principalmente em florestas plantadas e/ou submetidas a tratamentos para fins produtivos, como maneira de acelerar a produção de madeira e assegurar uma fonte contínua de lenho (FULLER, 1993; HAUSRATH, 1982). A talhadia também é comumente utilizada na vegetação nativa do Domínio Fitogeográfico da Caatinga, imprimindo consequências na diversidade, na regeneração e na produtividade das plantas da região (RIEGELHAUPT et al, 2010; SANTOS, 2015; ALBUQUERQUE, 2017). É imperativo compreender os possíveis efeitos de um método de manejo comum na Caatinga (talhadia) sobre as relação clima-crescimento da sua vegetação.

A Dendrocronologia também é utilizada para avaliar a relação clima-crescimento de árvores talhadas ou que passaram por outros processos de corte para induzir regeneração acelerada (CAMARERO, 2022; AUYKIM, 2017; STOJANOVIĆ, 2017). Geralmente há especulações sobre as possíveis diferenças de sensibilidade à variáveis climáticas em crescimento de árvores talhadas e de um grupo controle (árvores não-talhadas) nos sistemas de manejo florestal, alguns estudos têm feito esta análise de árvores talhadas (BILLAMBOZ, 2008; STOJANOVIĆ, 2017; HANECA, 2006; PIETRAS, 2016), especialmente na Europa, onde a prática é aplicada ao longo de séculos em áreas designadas (HAUSRATH, 1982). STOJANOVIĆ et al (2017) analisou árvores talhadas e não-talhadas de *Quercus petraea* na Chéquia, Europa Central e verificou que árvore talhadas são mais sensíveis ao aumento da temperatura no mês de Junho e estresse hídrico no verão, mas menos sensíveis a períodos

secos na primavera. Junho é o último mês da primavera e estação de crescimento na área desse estudo. A despeito disso, também foi percebido que árvores talhadas tendem a crescer mais rápido nos primeiros 40 anos de vida; conforme as árvores vão envelhecendo, contudo, sua produtividade de madeira e resistência aos estresses abióticos vão diminuindo. Por fim, percebeu-se uma maior sensibilidade de árvores não-talhadas à restrição hídrica ao longo do ano e não apenas no verão. As diferenças de crescimento e de resposta climática são atribuídas a diferenças na proporção caule/raiz (STOJANOVIC et al, 2017). As informações obtidas pelo autor oferecem subsídios para o manejo florestal na Europa voltado para a mitigação dos distúrbios negativos das mudanças climáticas. Buscamos avaliar se a talhadia produz efeitos distintos na sensibilidade climática e no crescimento diamétrico das árvores da Caatinga, tendo em vista as diferenças de clima e de solo entre os ambientes e das adaptações distintas de cada espécie.

A sensibilidade, no estudo supracitado e neste trabalho, se refere ao grau de resposta às oscilações interanuais das variáveis climáticas (precipitação e temperatura máxima na estação de crescimento) (STOJANOVIC, 2017). Investigar se essa diferença de sensibilidade também ocorre nas árvores da FTSS do semiárido brasileiro submetidas a diferentes métodos de manejo (talhadia ou não-talhadia) pode subsidiar tomadas de decisão que visem otimizar as práticas de manejo voltadas para a mitigação das consequências das mudanças climáticas sobre a Caatinga e o seu manejo sustentável como sugerido por Schöngart (2010). É necessário, contudo, considerar que as condições edafoclimáticas da FTSS brasileira são bem distintas das encontradas na Europa central. Os solos em geral mais rasos da Caatinga não permitem o acúmulo do estoque hídrico que favorece plantas com maior proporção caule/raiz (AB'SABER, 2010), as diferenças de fenologia entre as espécies, consequências das diferenças de clima entre as localidades, também pode influenciar no crescimento e na sensibilidade (DIRZO, 2011). Além disso, a natureza distinta dos fatores limitantes na estação de escassez (temperatura mínima na Europa e estresse hídrico na Caatinga) (DIRZO, 2011) e principalmente as diferenças dos impactos esperados com o aquecimento global para cada região (WANG, 2017; IPCC, 2014) certamente trarão um resultado diferente para sensibilidade ligada à talhadia na Caatinga dos observados em climas temperados.

Diante do expostos, esperamos as árvores do Domínio Fitogeográfico da Caatinga respondam às variações de El Niño da seguinte forma:

- 1) A variação do crescimento anual (medida pelo RWI anual) de todas as árvores (talhadas e controle) deverá ser sincronizada com a variação interanual de estresse hídrico. A correlação dos índices de largura dos anéis de crescimento (RWI) com a

precipitação deve ser positiva, enquanto as correlações com temperatura máxima e com a TSM nas zonas diagnósticas de ENSO devem ser negativas;

2) Árvores talhadas apresentarão menor variação interanual de RWI do que as árvores controle em relação às variáveis climáticas: precipitação, temperatura máxima e temperatura da superfície do mar na porção equatorial do Oceano Pacífico Oriental (Zonas Niño 1, 2, 3 e 3.4, usadas para calcular os índices de ENSO);

3) Árvores talhadas apresentarão crescimento diamétrico mais rápido, alcançando um diâmetro acumulado maior do que as árvores controle da mesma idade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Espécie-modelo

Selecionamos *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm. (Cumaru ou Umburana-de-cheiro) para este estudo por ser uma árvore com ampla distribuição na Florestas Sazonalmente Secas da América do Sul, inclusive no Domínio Fitogeográfico da Caatinga (CNCFlora, 2021; SELEME, 2022, CARVALHO, 2014). Adicionalmente, estudos prévios em outras Florestas Tropicais Sazonalmente Secas demonstram que essa espécie forma anéis de crescimento interanuais (LÓPEZ, 2022; GODOY-VEIGA, 2020; BRIENEN, 2005). Portanto, é uma espécie-modelo ideal para reconstruções climáticas sob efeitos de eventos El Niño como é o caso do Domínio Fitogeográfico da Caatinga, região semiárida do Nordeste brasileiro.

O cumaru é uma árvore decídua que atinge 20 metros de altura (na Caatinga), tem caule liso, esfoliante e odorífero e costuma ocorrer em áreas de solo pedregoso (SELEME, 2022). A casca externa solta lâminas avermelhadas, delgadas, irregulares e transparentes, enquanto a casca interna é levemente amarelada, bastante fibrosa e possui o odor forte característico da cumarina (CARVALHO, 2014). A casca e as sementes têm uso na medicina tradicional (CARVALHO, 2014) e a madeira é bastante valiosa para a indústria moveleira e da marcenaria, o que leva a uma intensa exploração desta espécie (OLDFIELD, 1998; LORENZI, 1992). Por ser uma espécie visada pela madeira, esperamos encontrar vários indivíduos que tenham passado pela talhadia durante o processo de extração do seu lenho.

2.2. Local do estudo

Para este estudo, selecionamos indivíduos de uma população presente Estação Ecológica de Aiuaba (Figura 2) (BRASIL, 2001) e arredores por ser uma região de FTSS sob forte influência de da ZCIT, por sua vez influenciada por eventos de ENSO. Portanto, local ideal para inferirmos sobre os efeitos das mudanças climáticas no manejo florestal de populações arbóreas, através da talhadia (Figura 3), no Domínio Fitogeográfico da Caatinga. A Estação Ecológica (ESEC) de Aiuaba, é uma das maiores Unidades de Conservação de Proteção Integral da Caatinga com uma área de 11.747 hectares (CNUC). Além disso, conta com uma extensa área preservada e representativa da vegetação dominante no região do Semiárido Brasileiro, a Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS) (BRASIL, 2001; MORO et al 2016; LEMOS, 2015; MORAIS, 2019; CAVALCANTE, 2022). Sendo, assim, o local

ideal para encontrar abundância e diversidade de indivíduos de espécies arbóreas da Caatinga. Além disso, as cronologias estabelecidas na ESEC de Aiuaba por Aragão et al. (2022) para outras três espécies de outras famílias botânicas indicaram forte relação clima-crescimento na região.

Ademais, a Estação é composta por um mosaico de áreas com usos pregressos variados. Os seus 11 mil hectares são formados por uma mistura de antigos terrenos, fazendas e sítios particulares e por terras de domínio e devolutas da União (BRASIL 2001). Dessa maneira, há, com relativa proximidade, espaços com manejos completamente distintos ao longo dos anos. É possível encontrar locais próximos e com características abióticas similares tanto com populações que não passaram por talhadia, quanto com populações que passaram por talhadia.

2.3. Critérios de inclusão e amostragem dendrocronológica

As amostras para estudos de dendrocronologia foram feitas de modo a tentar replicar a estrutura etária populacional da espécie, que foi dividida em classes de diâmetro (com a estimativa de idade tomando por base o diâmetro), como postula a literatura (SPEER, 2012; BINKLEY, 2008). Incluímos amostras de indivíduos com diâmetro mínimo de 30 cm de circunferência no tronco na altura do peito pelos seguintes motivos:

- a) A coleta é feita com uma broca que deixa uma injúria cilíndrica de cerca de 2 a 3 cm de diâmetro que transpassa o caule da planta (correspondente à amostra). Árvores de circunferência muito pequena poderiam cair durante a coleta, prejudicando a qualidade da amostra e as condições de segurança em campo;
- b) Árvores de menor circunferência tendem a ser mais jovens e, portanto, só teriam registros de pequenos períodos das variações de crescimento em razão das variações das condições climáticas locais.

As amostras foram coletadas em duas categorias distintas de indivíduos:

- a) Indivíduos com evidências claras talhadia (cicatrices de corte total da parte aérea), doravante denominados apenas “árvores talhadas”. A evidência consiste em uma cicatriz próxima a 30 cm acima do chão a partir da qual brotam pelo menos dois troncos (Figura 3);
- b) Indivíduos sem evidência de talhadia, portanto, sem cicatrizes de corte e sem ramificações baixas, doravante denominadas “árvores não-talhadas” ou “grupo controle” (Figura 4).

2.4. Amostragem dendrocronológica não-destrutiva

A amostragem Dendrocronológica não-destrutiva consiste na retirada de um pedaço do xilema secundário da árvore que abrange de uma extremidade da casca à outra extremidade, passando pelo centro do cerne da árvore. Preferencialmente, deve-se coletar um “raio” inteiro, que vai da casca até o cerne do tronco, embora também seja possível fazer datações com fragmentos incompletos (FRITTS, 2001; SPEER, 2012). Em casos de coletas destrutivas onde é feita a supressão de indivíduos, pode ser utilizado um “disco” cortado do tronco para esse tipo de estudo (FRITTS, 2001; SPEER, 2012).

Nas zonas temperadas, para coletas não-destrutivas, usualmente são utilizadas brocas manuais com cerca de 5 mm de diâmetro e comprimentos variados para a coleta de madeira (SPEER, 2012). Essas brocas produzem amostras cilíndricas e a direção de coleta dessas amostras segue uma linha imaginária que vai de uma extremidade da casca à outra extremidade da árvore passando pelo centro de seu cerne. Esse método apresenta as vantagens de manter a copa intacta e de ser menos estressante para a árvore (SPEER, 2012). Porém, este tipo de amostragem se torna inviável em árvores com alta densidade da madeira, como é o caso da maioria das árvores da Caatinga, porque, além da dificuldade de perfuração, as brocas manuais quebram facilmente durante a coleta. No nosso estudo, as amostras foram coletadas e analisadas de acordo com a metodologia estabelecida por Fritts, (2001) e Speer (2012). Porém com as alterações necessárias devido à dureza elevada das madeiras tropicais, sobretudo da Caatinga (KROTTENHALER, 2015).

Um dos métodos possíveis para coleta de amostras dendrocronológicas em árvores de dureza elevada é o uso de uma broca oca de aço especialmente tratado de 20 mm de diâmetro e cerca de 40 cm de comprimento (Figura 5) acoplada a um motor de dois tempos movido a gasolina. A broca motorizada é capaz de produzir amostras cilíndricas de 15 mm de diâmetro com qualidade similar à da broca manual (Figura 6) (KROTTENHALER, 2015). Para cada árvore foram coletadas pelo menos três raios para evitar que a datação fosse enviesada por deformidades na madeira ou características específicas daquele tronco ou daquela seção do tronco em particular (inclinação, madeira de reação, infestação por organismos xilófagos etc.) (SPEER, 2012). Na maioria dos casos, cada árvore foi perfurada somente duas vezes, contanto que a broca a atravessasse completamente, coletando dois raios em cada amostra/perfuração, duas perfurações bem sucedidas resultaram em um total de quatro raios. Eventualmente, algumas amostras se partiram, queimaram ou demonstraram ser inadequadas para a análise por outros motivos quaisquer. Essas amostras foram descartadas e a coleta foi

feita novamente para se obter o número necessário de amostras. As coletas foram feitas posicionando a broca tão perpendicularmente ao tronco quanto possível (Figura 7) a uma altura de 1,20 m acima do solo. Também foram evitados troncos com deformidades, inclinações acentuadas e sinais de ataques por organismos xilófagos.

Na amostragem das árvores talhadas, que possuíam mais de um tronco (Figura 3), as amostras foram coletadas preferencialmente no tronco de maior diâmetro. Ocasionalmente, foi coletado o tronco com o segundo maior diâmetro por motivos de segurança em campo e as observações pertinentes foram incluídas nos cálculos estatísticos. Árvores não-talhadas possuíam apenas um tronco a 1,20 m de altura (Figura 4).

Os indivíduos de *A. cearensis* foram localizados através da busca em locais onde sua presença foi indicada por pessoas que moram na região e que nos auxiliaram nas atividades de campo. Após a localização de um indivíduo em uma dada área, este e os demais indivíduos próximos que atendiam ao critério mínimo de 30 cm de perímetro foram coletados. Este método foi repetido em duas áreas próximas de solo pedregoso, uma que havia passado por talhadia antes da formalização da UC e uma área em que não havia passado por esse tipo de manejo.

Foram coletadas amostras de 38 indivíduos, 19 de cada classe (talhadas ou controle). Para as análises finais, foram incluídas as amostras de 26 indivíduos, 13 de cada classe. A exclusão das amostras se deu por três motivos principais. Algumas amostras se deterioraram rapidamente pela ação de organismos xilófagos (fungos e besouros). Outras apresentaram deformidades na madeira invisíveis no momento da coleta, mas que causam o desalinhamento, ilegibilidade, dessincronia ou deformação de seus anéis, impossibilitando as análises. Também foram descartados alguns raios que, por motivos indeterminados, apresentaram baixa correlação com a série média, o que eventualmente acontece nesse tipo de estudo (SPEER, 2012).

2.5. Preparo e escaneamento das amostras.

Em campo, tão logo foi coletada, cada amostra foi fixada com bastante firmeza a uma haste de madeira comumente utilizada para churrasco usando fita adesiva, crepe ou gomada (Figura 8). Essa etapa evita que a madeira das amostras se envergue em razão da perda de água, o que é comum para a espécie (SPEER, 2012; CARVALHO, 2014). O número de coleta foi anotado em fichas de campo de Dendrocronologia aplicada a Silvicultura (Figura 9), que foram adaptadas para pesquisa e onde também constavam a altura, a geolocalização e a circunferência dos troncos da árvore. A altura foi aferida usando uma vara telescópica com

altura de 15,25m; a geolocalização foi feita usando um GPS modelo Garmin eTrex 10 e a medição das circunferências a 1,20 m acima do solo e no nível do solo foram feitas com uma fita métrica. Todas as fichas de campo foram digitalizadas e os dados tabulados em planilhas eletrônicas para inclusão nas análises dentro cronológicas posteriores.

Em laboratório, as amostras foram organizadas de modo que permitisse a vista transversal da amostra cilíndrica do caule. É possível observar a posição adequada através das fibras da casca, que devem estar perpendiculares ao assoalho do suporte de madeira, como na Figura 10. Assim, fica mais fácil visualizar as estruturas que indicam a provável formação de anel anual de crescimento após o lixamento. Preservada a vista transversal, as amostras foram coladas em suportes de madeira com 20 mm de largura, 15 mm de altura e comprimento variado, a depender do tamanho da amostra (Figura 10). Os ajustes de tamanho de comprimento dos suportes foram feitos usando uma serra tico-tico. Os suportes foram adquiridos com uma cavidade retangular de 15 mm de largura por 7 mm de altura, feitos com uma fresa, onde a amostra foi acomodada e fixada com cola branca (Figura 11). Após a colagem, a amostra foi deixada secando ao ar livre por cerca de dois dias.

Após a fixação das amostras, foi feito o seu lixamento em duas etapas. A primeira etapa foi feita com uma lixadeira de cinta. Foram usadas lixas de cinta de grão 80. O lixamento foi feito em todas as amostras ao longo da face transversal exposta. O intuito dessa etapa é desgastar pelo menos um terço dessa face da amostra. Desse modo, fica exposta uma área de xilema secundário que permite a visualização das estruturas que indicam a provável formação de anel anual de crescimento (Figura 10 e Figura 11) (SPEER, 2012).

A segunda etapa é feita com uma lixadeira orbital. Foram usadas lixas de grão 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200. O lixamento foi feito em todas as amostras ao longo da face transversal exposta. O intuito dessa etapa é remover as ranhuras deixadas pela lixadeira de cinta. O aumento gradual da granulometria permite a redução de ranhuras cada vez menores. Essa parte do processo é fundamental para a produção das imagens de alta resolução utilizadas para a datação (SPEER, 2012).

Por fim, terminado o lixamento, todas as amostras foram escaneadas através de um Scanner Epson Perfection V850 Pro. Foram geradas imagens de 1200 dpi (Figura 12). Com essa resolução, é possível visualizar bem as estruturas que normalmente indicam a formação de um anel anual de crescimento. Em *Amburana cearensis*, os anéis são delimitados por uma faixa de fibras sem estruturas de vaso ou má formação do parênquima; ao fim do anel de crescimento, o parênquima paratraqueal que surge tem formato achatado, diferente do normal, que é arredondado (BRIENEN, 2005). A Figura 13 apresenta exemplos dessas estruturas. As

imagens geradas foram duplicadas e recortadas para isolar um único raio. Assim, havia uma imagem de alta resolução para cada um dos raios amostrados de cada um dos indivíduos coletados.

2.6. Datação e mensuração dos anéis das amostras e checagem preliminar

2.6.1. CooRecorder

As imagens produzidas com a *scanner* foram analisadas e datadas utilizando o programa de computador CooRecorder. A metodologia de datação e mensuração dos anéis é padronizada na literatura e visa a obtenção de amostras com alto grau de correlação (LARSSON, 2014; MAXWELL, 2021). Cada raio foi datado individualmente, após isso, as cronologias foram comparadas entre raios e entre indivíduos, a fim de identificar erros (DOUGLASS, 1941). A datação consiste em marcar e datar anéis no CooRecorder, a começar pelo mais externo, que corresponde ao ano de coleta, 2021 (Figura 13).

O CooRecorder conta com uma série de ferramentas que marcam e medem a distância de cada anel até o centro do cerne, bem como o ano em que provavelmente foi formado. A diferença entre as distâncias de anéis sucessivos até o cerne indica a espessura de cada um. O programa salva as informações em um arquivo “.pos” associado à imagem. As informações contidas nesse arquivo incluem apenas o diâmetro nominal e o ano de cada anel. Análises estatísticas posteriores indicam a variação da espessura do anel dentro do conjunto de anéis por meio de um índice que padroniza os valores absolutos das amostras (que podem variar bastante com a classe diamétrica dos indivíduos) em um índice de média 1.

Uma série de fatores podem levar a erros que afetam negativamente a correlação. Notadamente, às vezes ocorre a formação de estruturas que parecem anéis (anéis falsos) ou, ainda, um anel verdadeiro não se forma completamente. Ambos os casos costumam ser identificados nas etapas seguintes ao comparar a amostra sob suspeita com as demais e, geralmente, se restringem a poucos indivíduos, sendo facilmente corrigidos (SPEER, 2012). Há, também, as árvores inclinadas, cujas amostras podem apresentar o centro do cerne deslocado e desalinhado com o centro do tronco; ou há árvores que não apresentam um tronco cilíndrico, formando “costelas”. Em ambos os casos, os raios de uma mesma árvore podem apresentar anéis de espessuras absolutas distintas. Essa situação afeta a medida do diâmetro nominal dos anéis, mas não prejudica a variação entre estes dentro do índice padronizado (SPEER, 2012). Além disso, é possível que alguns indivíduos ou raios, por motivos ainda não totalmente conhecidos, apresentem dessincronia em relação aos demais. Seja qual for o caso,

quando não representam uma fração significativa dos resultados, esses indivíduos ou raios podem ser descartados da análise final (SPEER, 2012).

2.6.2. CDendro

Ao final das datações, os arquivos “.pos” são compilados em um outro programa bastante utilizado na área e com metodologia padronizada, o CDendro (LARSSON, 2014). Esse programa compara e compila grandes grupos de amostras e permite realizar vários testes estatísticos que serão descritos a seguir. Este programa unifica vários arquivos “.pos” em um único espaço de trabalho. Nesse espaço, são feitos testes estatísticos no conjunto de amostras, comparando cada uma individualmente ao conjunto. Os testes que utilizamos para identificar amostras fora do padrão foram o T de Student e o de Correlação de Pearson. Amostras com correlação muito baixa com a série geral de amostras foram avaliadas, buscando possíveis erros na datação.

Os arquivos unificados foram usados para compor uma curva média de crescimento (.wid). Essa curva foi usada como referência para identificar possíveis erros de datação das amostras fora do padrão de tendência de crescimento apresentado pelo conjunto. O CDendro permite analisar os anéis de cada amostra em relação à média, contudo, é mais prático para fazer análises gerais de correlação, indicando apenas as maiores discrepâncias entre as amostras. Análises mais detalhadas, que indicam o anel (ou conjunto de anéis) específico onde provavelmente houve equívoco, ensejam o uso do COFECHA. O CDendro também é importante para compilar vários arquivos “.pos” em outros formatos de arquivos únicos. Existem diferentes tipos de arquivos compilados. Cada tipo tem informações, formatos e finalidades diferentes. Por fim, foram gerados, além do “.wid”, outros arquivos importantes para prosseguir com as análises. O primeiro foi o “.fh” STRIPPED Heidelberg, que contém informações da distância de cada anel até o cerne e é usado para as análises na biblioteca dplR no R (R Core Team, 2015; Bunn, 2017) que foram combinadas com as informações de campo. O segundo foi o “.rwl” Tucson, que agrupa os dados de espessura de anel em intervalos de 10 anos. O arquivo.rwl é usado no COFECHA e no R.

2.6.3. COFECHA

No COFECHA, usou-se a metodologia padrão (GRISSINO-MAYER, 2001; HOLMES, 1983). Foi feita uma filtragem mais refinada dos dados a partir do arquivo unificado.rwl. Realizamos testes de intercorrelação geral da série de amostras e da correlação específica de cada anel de cada amostra em relação à série. Esse programa separa os anéis em

grupos de dez anos. Dentro desses grupos, usa-se a medida do diâmetro para calcular a correlação e o desvio padrão de cada amostra e de cada anel de cada amostra em relação à média de todas. Anéis e amostras com correlação baixa com a média foram assinalados pelo programa. A indicação exata de cada possível equívoco na datação permitiu a correção direcionada dos erros. Com as informações obtidas no COFECHA, foi possível melhorar muito a segurança das datações (GRISSINO-MAYER, 2001).

2.7. Análises estatísticas no R

Além das análises feitas no CDendro e COFECHA, utilizamos análises estatísticas complementares através de bibliotecas do R (R Core Team, 2015) com ferramentas desenvolvidas especificamente para Dendrocronologia ou para análises estatística e produção de gráficos no geral: dplR; tidyverse; magrittr. cowplot; ggpubr; dplyr; climatology; treeclim e pointRes). A principal biblioteca utilizada foi a dplR (BUNN, 2017). Foram utilizados scripts adaptados a partir de modelos disponibilizados por colaboradores da UNICAMP. Os scripts serviram tanto para as análises estatísticas quanto para a produção dos gráficos.

O primeiro script objetivou produzir uma planilha eletrônica e identificar possíveis erros no preenchimento de dados. Os erros foram verificados e a planilha foi produzida com o cruzamento dos dados dendrocronológicos e os dados de campo. Os dados dendrocronológicos consistem nas informações dos arquivos “.pos” e dos outros arquivos compilados a partir deles. Verificamos se o diâmetro calculado a partir da circunferência medida em campo tinha discrepâncias significativas com a soma das espessuras dos anéis, as demais buscavam valores absolutos aberrantes ou valores nulos nas planilhas. A planilha utiliza os dados verificados (espessura dos anéis, idade e altura) para calcular outras variáveis (crescimento diamétrico, área basal, diâmetro cumulativo, área basal cumulativa, incremento de biomassa etc.). Outrossim, os indivíduos foram separados de acordo com as classes talhada/não-talhada.

O diâmetro das árvores não-talhadas foi calculado apenas calculando uma média ponderada entre a soma das espessuras dos anéis medidos no Coorecorder com o diâmetro calculado a partir da circunferência medida em campo. A mesma metodologia foi usada para medir o crescimento do tronco principal das árvores talhadas (Figura 14). O cálculo do crescimento real (com base no diâmetro total) das árvores talhadas foi executado de maneira diferente. As circunferências de todos os troncos foram transformadas em diâmetros; esses diâmetros foram usados para calcular áreas basais, que foram somadas e resultaram na área basal total do indivíduo. Essa área basal total, por fim, foi usada para calcular o diâmetro total

do indivíduo para o cálculo de diâmetro por idade e das variáveis derivadas dessa (crescimento diamétrico, diâmetro cumulativo, incremento de área basal e área basal cumulativa). Desse modo, ficou mais adequadamente representado o incremento anual de biomassa de cada árvore talhada (Figura 15).

O segundo objetivo foi calcular o índice anual de crescimento relativo dos anéis padronizando os valores absolutos diferentes para que se distribuam ao longo de um índice com a média igual a 1 (chamado RWI). Dada a natureza do cálculo, esse índice é usado para representar a variação interanual de crescimento da árvore independentemente dos valores absolutos de diâmetro. No nosso estudo, esse foi o parâmetro usado para comparar as diferenças de sensibilidade entre árvores talhadas e não-talhadas. Esse índice (RWI) foi usado para construir uma série temporal (knmi_out.txt) inserida como *input* da cronologia na plataforma [KNMI Climate Explorer](#) (Climexp) (TROUET, 2013), que é utilizada para obter dados climáticos e para a produção de mapas de correlação espacial de determinadas variáveis climáticas (temperatura, precipitação e índices de ENSO) com a série temporal inserida na plataforma. Os valores anuais de RWI também foram usados no próprio R em testes de correlação de Pearson e de Regressão Linear para investigar diferenças na sensibilidade às variáveis climáticas causadas pela interação com o tratamento (talhadas e não-talhadas).

2.8. Definição das variáveis de crescimento

2.8.1. Crescimento diamétrico nominal

Para árvores do grupo controle e para o tronco principal das árvores talhadas, foi calculado a partir da média entre a soma dos anéis de crescimento medidos no CooRecorder e da circunferência de cada tronco aferida em campo. Para os troncos das árvores talhadas que não o principal, foi calculado assumindo o diâmetro obtido a partir da circunferência basal de todos os troncos somados considerada como a medida de campo utilizada na obtenção da média.

2.8.2. RWI (Índice de Anel Largura de Anel, Ring Width Index)

O controle de qualidade da datação e a remoção de tendências biológicas não-relacionadas ao clima foram feitos usando a Dendrochronology Program Library em R (dplR; BUNN, 2008). Para cada árvore, um índice de largura do anel (RWI) foi calculado

padronizando a série total de largura do anel dividindo as medições brutas com um valor ajustado de acordo com uma função spline de suavização (FRITTS, 2001; SPEER, 2012). Isso produziu um índice adimensional com média 1,0 e variância homogênea, removendo a variabilidade de baixa frequência devido a efeitos biológicos, permitindo a análise do crescimento em termos relativos de indivíduos de classes diamétricas distintas. Os RWI de cada árvore foram usados para calcular o RWI médio de 3 grupos distintos: o das árvores talhadas, o das árvores controle e o de todas as árvores juntas. Assim, o valor médio de RWI foi analisado separadamente para cada grupo dependendo do tratamento e para o grupo maior, que inclui árvores talhadas e controle, permitindo investigar as possíveis diferenças de sensibilidade climática entre elas.

2.9. Testes das hipóteses

2.9.1. Variações clima-crescimento

Avaliamos, através de teste de correlação de Pearson e de uma regressão linear múltipla, as relações das variáveis climáticas com o diâmetro dos anéis em duas etapas. Primeiro, foi analisado um conjunto de RWI de todas as árvores em relação às variáveis climáticas, a despeito da talhadia, após isso, foram analisados conjuntos de RWI de árvores talhadas e não talhadas separadamente.

Essas análises foram complementadas com o mapa de correlação espacial, que foi feito com o conjunto de RWI anuais de todas as árvores compilados no arquivo knmi_out.txt. Esse arquivo foi carregado na plataforma Climexp (TROUET, 2013) e, lá, correlacionado espacialmente com as variáveis-chave nos períodos adequados para cada uma (precipitação, temperatura máxima, e TSM em áreas de ENSO).

2.9.2. Diferenças de sensibilidade climática

O teste dessa hipótese foi realizado analisando os RWI anuais médios de cada classe de indivíduos separadamente utilizando o R (R Core Team, 2015). Fizemos testes de correlação de Pearson entre o conjunto de RWI de cada classe de indivíduo com cada variável climática separadamente através de modelos lineares múltiplos. Posteriormente, fizemos análise de regressão linear (LM) múltipla buscando os valores de p em modelos comparando o crescimento padronizado com as variáveis ambientais em interação com a talhadia. Foi feita uma análise de covariância para buscar diferenças entre as duas retas obtidas por regressão linear.

2.9.3. Crescimento diamétrico mais rápido em árvores talhadas

O diâmetro das árvores não-talhadas foi calculado apenas encontrando o valor ponderado entre a soma das espessuras dos anéis com o diâmetro calculado a partir da circunferência medida em campo. A mesma metodologia foi usada para medir o crescimento do tronco principal das árvores talhadas. O cálculo do crescimento real (com base no diâmetro acumulado) das árvores talhadas foi executado de maneira diferente: as circunferências de todos os troncos foram transformadas em diâmetros; esses diâmetros foram usados para calcular áreas basais, que foram somadas e resultaram na área basal total do indivíduo. Essa área basal total, por fim, foi transformada em um diâmetro que foi utilizado com diâmetro total do indivíduo para o cálculo de diâmetro por idade e das variáveis derivadas dessa (crescimento diamétrico, diâmetro cumulativo, incremento de área basal e área basal cumulativa).

Desse modo, ficou representando mais adequadamente o incremento anual de biomassa de cada árvore talhada. Para descrever a tendência média de relação entre idade e diâmetro com interação da talhadia, foi utilizada uma regressão não linear flexível do tipo LM (Linear Model) simples entre idade e diâmetro e múltipla incluindo a classe de talhadia.

2.10. Elaboração dos gráficos e mapas

As fotos das amostras e dos materiais e procedimentos de pesquisa foram tiradas durante a execução do projeto. Os gráficos foram produzidos no R, dentro dos mesmos scripts usados nas análises estatísticas. Utilizamos as bibliotecas “tidyverse”, “cowplot” e “ggpubr”. Os mapas de correlação espacial foram feitos no [KNMI Climate Explorer](#) (Climexp) (TROUET, 2013) a partir do arquivo “knmi_out.txt” produzido no R (R Core Team, 2015) a partir dos dados do arquivo.rwl. O arquivo knmi_out.txt consiste no valor anual médio do índice de espessura do anel padronizado (RWI) de todos indivíduos da série com ambas as classes de indivíduos.

Uma vez na plataforma [Climexp](#), os índices de crescimento médio dos indivíduos podem ser comparados a diversas variáveis disponibilizadas publicamente (TROUET, 2013). O arquivo “knmi_out.txt” é inserido na plataforma, que indica em que locais do planeta as variações anuais nesse índice condizem com as variações anuais das variáveis analisadas. Assim, o processo foi realizado individualmente para cada variável. O mapa resultante indica as regiões onde as oscilações da variável selecionada (precipitação, temperatura máxima e TSM) tiveram relação com as oscilações de RWI ano a ano. A variável selecionada para o

primeiro mapa foi a precipitação nos meses de maior precipitação em Aiuaba (Figura 16 e Figura 17) (CHIRPS) (FUNK, 2015). Para o segundo mapa, foi escolhida a TSM (Temperatura na Superfície do Mar) nas Zonas Niño 1, 2, 3 e 3.4 (Figura 1) (NOAA) (Reynolds e Smith, 1994). Para o terceiro mapa, foi escolhida a temperatura máxima no meio do período chuvoso (Figura 18) (Dados de grade das reconstruções de precipitação de interpolação ótima de 1° do “[Berkeley Earth](#)”).

O mapa de distribuição de *A. cearensis* (Figura 19) foi compilado na plataforma [gbif.org](#). Essa plataforma compila os dados de ocorrência de espécies de um conjunto de plataformas locais de compilação de dados de herbário, a exemplo, o Flora do Brasil 2020 (ROBERTSON, 2014).

O balanço hídrico de Aiuaba foi produzido no R (R Core Team, 2015) com scripts disponibilizados por colaboradores da UNICAMP e com base em dados disponíveis no site da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos ([FUNCEME](#)). analisamos

3. RESULTADOS

3.1. O crescimento foi sincronizado com as variáveis climáticas analisadas

Em ambas as classes de indivíduos, a variação anual de crescimento ocorreu de maneira sincronizada com a variação anual de estresse hídrico. A correção com precipitação foi positiva, com $p < 0,05$ (Figura 20) enquanto as correlações com a temperatura máxima e com a temperatura da superfície nas Zonas Niño foram negativas, com $p < 0,05$ para ambos os testes de correlação (Figura 1; Figura 16; Figura 18 e Figura 20), confirmando que esta espécie apresenta bom potencial para reconstruções climáticas.

Os mapas de correlação espacial foram feitos a partir de um banco de dados produzidos no R (exportado através do arquivo “knmi_out.txt”) que contém o RWI médio de todos os raios analisados de todas as árvores coletadas para cada ano incluído na datação, formando uma linha temporal com variações interanuais de valores de RWI. Esse banco de dados foi inserido na plataforma Climexp, onde a variação dos valores de RWI em função do tempo foi comparado com a variação interanual das variáveis climáticas ao longo do mesmo período de tempo. Desse modo, os mapas de correlação espacial (Figura 1; Figura 16 e Figura 18) demonstram as áreas onde há correlação entre as variações interanuais do Índice de Largura de Anel (RWI) e as variações interanuais das variáveis ambientais analisadas.

3.2. Não houve diferenças de sensibilidade climáticas entre talhadas e não-talhadas

Árvores talhadas e controle apresentaram respostas similares em termos de variação interanual de índices padronizados de largura do anel (RWI) em relação à variação interanual do clima. As regressões lineares analisando a influência da oscilação interanual das variáveis climáticas na variação interanual de RWI confirmaram a sensibilidade de indivíduos em ambos os tipos de tratamento (talhados e controle) (Figura 20). A análise de covariância entre as regressões investigando a possível interferência da talhadia não demonstrou relação significativa entre talhadia e variação interanual no índice RWI em relação à oscilação interanual das variáveis climáticas (precipitação, $p > 0,5$; temperatura máxima, $p > 0,9$; índices de ENSO, $p > 0,9$).

3.3. Árvores talhadas crescem mais rápido em diâmetro

Apesar da literatura especializada indicar que *A. cearensis* não brota após o corte, observamos esse fenômeno em vários indivíduos adultos da espécie (Figura 3). Quando comparamos indivíduos talhados e não talhados, verificamos que os caules que crescem após a talhadia apresentaram crescimento absoluto maior (inferido a partir do diâmetro cumulativo dos anéis) que os indivíduos controle ($p = 2e-16$) (Figura 15) da mesma idade/classe diamétrica (as árvores apresentaram entre 47 e 24 anos, com a idade média igual a 33 anos). Ou seja, embora o tronco principal dos indivíduos talhados tenha crescimento, em valores absolutos similares aos indivíduos não-talhados (Figura 14), foi observado que, árvores talhadas apresentam maior crescimento diamétrico acumulado total (contabilizando todos os troncos) (Figura 15).

3.4. Mudanças climáticas mostram tendência de distúrbios em amplas áreas

A correlação espacial entre precipitação e crescimento se estende por uma área com ampla interseção com a área de ocorrência da espécie (Figura 16 e Figura 19). A correlação espacial entre temperatura máxima na estação chuvosa e crescimento se estende por uma área com interseção moderada com a área de ocorrência da espécie (Figura 18 e Figura 19). Essas interseções indicam que a futura diminuição da precipitação e aumento da temperatura afetarão essa espécie em quase todo o seu alcance de distribuição.

4. DISCUSSÃO

4.1. Sincronia entre variáveis climáticas e crescimento diamétrico

Além dos publicados Aragão et al (2022) para as espécies dos gêneros *Aspidosperma* sp. e *Handroanthus* sp., do mesmo local do nosso estudo e de Zuidema et al (2022) para diversas outras espécies arbóreas em outras Florestas Tropicais Secas, nossos resultados se somam para reforçar que arbóreas tropicais sob climas sazonalmente seco, como é o caso da Caatinga, apresentam anéis de crescimento anual de espessura bem estabelecida e que são bons *proxies* para avaliar as relações clima-crescimento, principalmente, as associadas à precipitação e à temperatura (BRIENEN, 2005; BRIENEN, 2010; ZUIDEMA, 2022; ARAGÃO, 2022; GODOY-VEIGA, 2021; WILSON, 2010), tal como já amplamente relatado na literatura para Zonas Temperada (FRITTS, 2001; SPEER, 2012).

Os estudos já publicados com *A. cearensis* em outras florestas sazonalmente secas da América do Sul, avaliam a relação do crescimento com precipitação e a temperatura terrestre nessa espécie (BRIENEN, 2005; GODOY-VEIGA, 2021; LÓPEZ, 2022). Para o mesmo local do nosso estudo (ESEC de Aiuaba), Aragão et al (2022) verificou que as espécies de *Aspidosperma* sp. e de *Handroanthus* sp. apresentaram relação do crescimento com a TSM nas Zonas de Niño. Também verificamos essa relação em *A. cearensis*. Desse modo, a relação TSM-crescimento já registrada em *Handroanthus* sp. e *Aspidosperma* sp. por Aragão et al. (2022) e também por nós em *A. cearensis*, demonstram que o incremento de biomassa em árvores da Caatinga será negativamente afetado pelo aumento da frequência de eventos de El Niño no semiárido brasileiro em função do aquecimento global.

4.2. Sensibilidade similar entre diferentes grupos de manejo

O fato das árvores não-talhadas e talhadas demonstrarem sensibilidade similar no incremento anual de biomassa reflete o quanto os indivíduos desta espécie estarão igualmente vulneráveis às mudanças climáticas em curso no semiárido brasileiro independentemente de terem sido talhados ou não. As previsões, segundo Marengo (2011) são de redução de 30% na precipitação, aumento na temperatura e aumento na frequência de eventos extremos (secas). Também são esperados aumento na temperatura média e aumento na frequência de eventos de El Niño, ambos distúrbios com efeitos negativos para o crescimento vegetal (WANG, 2017).

Embora, Stojanovic (2017), tenha encontrado diferenças no crescimento diamétrico e na sensibilidade climática entre árvores talhadas e não talhadas de *Quercus petraea* (onde árvores talhadas foram mais sensíveis ao calor e menos sensíveis à seca) de acordo com as variações climáticas interanuais, *A. cearensis* teve resultados parcialmente divergentes. Enquanto o Cumaru apresentou maior crescimento diamétrico acumulado em indivíduos talhados, a sensibilidade climática entre as árvores talhadas e controle foi similar para todas as variáveis analisadas. É possível que o maior crescimento diamétrico em ambas as espécies tenha se dado pelo fator em comum em árvores talhadas das duas espécies: a menor proporção caule/raiz, que permite o foco dos recursos no estabelecimento da copa durante a estação de crescimento (BOND, 2001).

A vantagem da proporção caule/raiz, entretanto, pode ser limitada pela profundidade reduzida dos solos da Caatinga, que possuem menor capacidade de estoque hídrico e dificultam o desenvolvimento do sistema radicular (AB'SABER, 2010; PRADO, 1991), essa limitação pode aumentar a sensibilidade à seca de árvores talhadas na caatinga, igualando-a à sensibilidade das árvores controle e anulando a possível vantagem em relação à sensibilidade de estresse hídrico que *A. cearensis* poderia apresentar e que *Q. petraea* apresenta na primavera (STOJANOVIC, 2017).

Adicionalmente, quanto à maior sensibilidade das árvores talhadas na estação quente, em partes mais quentes da Europa, indivíduos não-talhados apresentaram maior sensibilidade à estação quente do que no local de estudo de Stojanovic em 2017 (CUFAR, 2014; RYBNÍČEK, 2015; LEBOURGEOIS, 2004), assim, as sensibilidade climáticas de árvores talhadas e não-talhadas se aproximam com o aumento da temperatura. Isso sugere que a temperatura elevada pode ser um filtro abiótico que aumenta a sensibilidade climática de árvores no geral, sendo mais proeminente nas árvores talhadas analisadas por STOJANOVIC (2017) pois essas não possuíam uma copa que produzisse sombra e ajudasse a amenizar a temperatura, enquanto suas árvores não-talhadas possuíam copa. O efeito da temperatura elevada se encontra mais constantemente presente na Caatinga e mais raramente na Europa, assim, se produzir alterações na sensibilidade climática das plantas, essas podem ser perceptíveis apenas na estação mais quente de lá, o verão, justamente quando as árvores talhadas de *Q. petraea* apresentam mais sensibilidade (STOJANOVIC, 2017). A temperatura mais elevada nas FTSS pode ser responsável por anular as diferenças de sensibilidade entre classes de indivíduos talhados e controle. Em um cenário de aumento da média de temperatura global, esse efeito sobre a sensibilidade certamente será relevante para o manejo florestal.

Outra distinção importante entre as espécies que pode implicar nessa alteração de sensibilidades climáticas é o estágio sucessional e as adaptações diferentes das espécies. A maior sensibilidade de *Quercus* ao calor do verão pode se dar pelo fato de ser uma espécie tardia e que cresce melhor sob a sombra (JARVIS, 1964), o que possivelmente aumenta sua sensibilidade a variações de temperatura e à intensidade da luz solar (tendo em vista que florestas talhadas não são sombreadas). Em contrapartida, a *Amburana cearensis* é uma espécie pioneira, heliófita e com adaptações xerófilas (CARVALHO, 2014), tolerando melhor as condições de temperatura elevada e de exposição ao sol mesmo enquanto talhada, o que possivelmente faz com que não seja especialmente sensível a essas condições enquanto talhada. Entretanto, mais estudos são necessários para avaliar as possíveis causas das semelhanças em sensibilidade climática a despeito da talhadia.

4.3. Crescimento diamétrico acelerado em árvores talhadas

A talhadia já é usada amplamente como método de aceleração de incremento de biomassa ou de facilitação do manejo em sistemas florestais diversos inclusive na Caatinga (FULLER, 1993; RIEGELHAUPT et al, 2010). Porém, normalmente se avalia árvores talhadas em florestas plantadas ou em florestas naturais severamente alteradas (PIETRAS, 2016; STOJANOVIĆ, 2017). São poucos os estudos que avaliam o efeito da talhadia em árvores de florestas tropicais naturais e, ainda, que as comparem a árvores da mesma espécie no mesmo local que não tenham passado por esse tipo de tratamento, a maioria dos estudos dessa sorte foi feita na Europa, sob condições totalmente distintas (CAMARERO, 2022; AUWKIM, 2017; PIETRAS, 2016; STOJANOVIĆ, 2017; HANECA, 2006; BILLAMBOZ, 2008). Apesar disso, nosso resultado de crescimento diamétrico acelerado de árvores talhadas condiz com o esperado para florestas plantadas ou naturais manejada com base na literatura de Silvicultura para o espaço de tempo considerado (33 anos, de acordo com a idade média das árvores) visto que a talhadia é uma técnica amplamente utilizada para aumentar a produtividade de sistemas silvicultores em volume de madeira a curto e médio prazo (HAUSRATH, 1982), mas que, em alguns casos, perde a produtividade a médio e longo prazo (HAUSRATH, 1982; STOJANOVIC, 2017). Como as árvores talhadas coletadas tiveram uma vida (a partir da rebrota) mais curta, elas não chegaram à classe diamétrica em que tiveram crescimento diamétrico menor que as árvores não-talhadas.

4.4. Outros aplicações possíveis para os dados

Com os dados obtidos nesse trabalho, também seria possível estimar o crescimento médio anual em diâmetro. Esse dado pode ser usado, junto à altura, para estimar o incremento anual de biomassa. Estimativas de incremento de biomassa em relação às variáveis climáticas podem ser usadas no GOL (*Growth Oriented Logging*), que visa estabelecer Diâmetro Mínimo de Corte (DMC) e tempo entre os ciclos de corte que permita recuperação de uma porcentagem-alvo da madeira existente em determinada floresta antes do primeiro ciclo de modo a permitir o manejo desse recurso madeireiro por mais tempo e de maneira mais sustentável (SCHÖNGART, 2010; ANDRADE, 2015).

5. CONCLUSÃO

Concluimos que *A. cearensis* é uma espécie que rebrota após cortada e de alta confiabilidade para avaliar as correlações de clima (precipitação, temperatura e TSM em zonas de Niño) e crescimento (diâmetro cumulativo e índice de largura do anel) não só nas áreas onde já foi estudada, mas também na parte setentrional da Caatinga. Além disso, também reforçamos que a TSM em áreas diagnósticas de eventos de ENSO tem potencial de uso como *proxy* das relações clima-crescimento vegetal, sobretudo em áreas sob influência direta de fenômenos ligados a El Niño e La Niña.

Adicionalmente, este trabalho traz a informação que, a despeito do crescimento diamétrico mais acelerado em relação a árvores não-talhadas, as árvores de *A. cearensis* em florestas naturais manejadas submetidas ou não a talhadia apresentam variação interanual de crescimento diamétrico similarmente modulado pelas mudanças anuais das condições climáticas avaliadas (temperatura máxima, precipitação e índices de ENSO). Desse modo, independentemente do manejo prévio a nível individual, árvores dessa espécie estarão sujeitas aos efeitos negativos das mudanças climáticas esperados (aumento da temperatura e do estresse hídrico) para o futuro, que devem afetar diretamente a maior parte da sua área de ocorrência, as FTSS da América do Sul. Esse distúrbio provavelmente se estenderá a outras espécies das FTSS, algumas das quais já foram avaliadas por trabalhos dendrocronológicos. Estudos adicionais de dendrocronologia nas FTSS da região podem acrescentar informações valiosas sobre os impactos de diferentes formas de manejo sobre as espécies das FTSS no contexto das mudanças climáticas antropogênicas.

6. REFERÊNCIAS

- AB'SABER, Aziz Nacib. No domínio das caatingas. A obra de Aziz Nacib Ab'Sáber, 2010.
- ALBUQUERQUE, Ulysses Paulino et al. People and natural resources in the Caatinga. In: Caatinga. Springer, Cham, 2017. p. 303-333.
- ANDRADE, Victor Hugo Ferreira. Modelos de crescimento para *Hymenaea courbaril* L. e *Handroanthus serratifolius* (Vahl) SO Grose em floresta de terra firme utilizando análise de anéis de crescimento. 2015.
- ARAGÃO, José Roberto V.; ZUIDEMA, Pieter A.; GROENENDIJK, Peter. Climate-growth relations of congeneric tree species vary across a tropical vegetation gradient in Brazil. *Dendrochronologia*, v. 71, p. 125913, 2022.
- AUYKIM, Anatta; DUANGSATHAPORN, Khwanchai; PRASOMSIN, Patsi. Growth of teak regenerated by coppice and stump planting in Mae Moh Plantation, Lampang province, Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, v. 51, n. 4, p. 273-277, 2017.
- BILLAMBOZ, André. Dealing with heteroconnections and short tree-ring series at different levels of dating in the dendrochronology of the Southwest German pile-dwellings. *Dendrochronologia*, v. 26, n. 3, p. 145-155, 2008.
- BOND, William J.; MIDGLEY, Jeremy J. Ecology of sprouting in woody plants: the persistence niche. *Trends in ecology & evolution*, v. 16, n. 1, p. 45-51, 2001.
- BRASIL. Decreto. nº 9131 de 6 de fevereiro de 2001. Cria a Estação Ecológica de Aiuaba, no Município de Aiuaba, no Estado do Ceará e dá outras providências. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/DNN/2001/DNN9131.htm
- BRIENEN, Roel JW et al. Climate-growth analysis for a Mexican dry forest tree shows strong impact of sea surface temperatures and predicts future growth declines. *Global Change Biology*, v. 16, n. 7, p. 2001-2012, 2010.;
- BRIENEN, Roel JW; ZUIDEMA, Pieter A. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: a test for six species using tree ring analysis. *Oecologia*, v. 146, n. 1, p. 1-12, 2005.
- BUNGE, Lucia; CLARKE, Allan J. A verified estimation of the El Niño index Niño-3.4 since 1877. *Journal of Climate*, v. 22, n. 14, p. 3979-3992, 2009.
- BUNN, A. et al. dplR: Dendrochronology Program Library in R [online]. R package version 1.6.3. 2017.

CAMARERO, J. Julio et al. Growth history of pollarded black poplars in a continental Mediterranean region: A paradigm of vanishing landscapes. *Forest Ecology and Management*, v. 517, p. 120268, 2022.

CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. *Espécies arbóreas brasileiras*. 2014.

CAVALCANTE, C. V. G.; BARROSO, D. F. R. G.; SOARES ARAÚJO, FRANCISCA; MANTOVANI, W. *Percepção Ambiental Em Unidade de Conservação de Proteção Integral: Estação Ecológica de Aiuaba - CE. BIODIVERSIDADE BRASILEIRA.*, 2022.

CNCFlora. *Amburana cearensis* in Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2 Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em <[http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Amburana cearensis](http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Amburana%20cearensis)>. Acesso em 27 novembro 2022."

CNUC 1.0. [Mma.gov.br](http://mma.gov.br). Disponível em: <<https://cnuc.mma.gov.br/map>>. Acesso em: 7 dez. 2022."

COLLINS, Mat et al. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience*, v. 3, n. 6, p. 391-397, 2010.

CUFAR, Katarina et al. Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees*, v. 28, n. 5, p. 1267-1277, 2014.

DE OLIVEIRA SANTOS, João Paulo et al. Environmental Degradation and Risk of Desertification in Alto Sertão Region, Alagoas State, Brazil. *Revista Geama*, p. 191-195, 2017.

DIRZO, Rodolfo et al. *Seasonally dry tropical forests: ecology and conservation*. Island Press, 2011;

DOUGLASS, Andrew E. Crossdating in dendrochronology. *Journal of Forestry*, v. 39, n. 10, p. 825-831, 1941.

EVA, Hugh D. et al. *A vegetation map of South America*. European Commission, 2002.

FERREIRA, Thomás R. et al. Identification of desertification-sensitive areas in the Brazilian Northeast through vegetation indices. *Engenharia Agrícola*, v. 37, p. 1190-1202, 2017.

FRITTS, H.C. *Tree Rings and Climate*. Birkenhead: Academic PressInc.(London) Ltd., 2001.

FULLER, R. J. et al. *Coppiced woodlands: their management for wildlife*. Peterborough: Joint Nature Conservation Committee, 1993.

GODOY-VEIGA, Milena et al. First *Amburana cearensis* (Fabaceae) tree-ring chronology in Brazil in a dry forest shows great potential for climate reconstruction. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2020. p. 11379.;

GODOY-VEIGA, Milena et al. The value of climate responses of individual trees to detect areas of climate-change refugia, a tree-ring study in the Brazilian seasonally dry tropical forests. *Forest ecology and management*, v. 488, p. 118971, 2021.

GRISSINO-MAYER, Henri D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. 2001.

HANECA, Kristof et al. Dendrochronology in suboptimal conditions: tree rings from medieval oak from Flanders (Belgium) as dating tools and archives of past forest management. *Vegetation History and Archaeobotany*, v. 15, n. 2, p. 137-144, 2006.

HAUSRATH, Hans. *Geschichte des deutschen Waldbaus: von seinen Anfängen bis 1850*. Hochschulverlag, 1982.

HOLMES, Richard L. Program COFECHA user's manual. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona, Tucson, 1983.

IPCC, A. IPCC Fifth Assessment Report—Synthesis Report. 2014.

IPCC, A. IPCC First Assessment Report—Synthesis Report. 1990.

IPCC, A. IPCC Fourth Assessment Report—Synthesis Report. 2007.

IPCC, A. IPCC Second Assessment Report—Synthesis Report. 1995.

JARVIS, P. G. The adaptability to light intensity of seedlings of *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. *The Journal of Ecology*, p. 545-571, 1964.

KROTTENTHALER, Stefan et al. A power-driven increment borer for sampling high-density tropical wood. *Dendrochronologia*, v. 36, p. 40-44, 2015.

LARSSON, L. CooRecorder and Cdendro programs of the CooRecorder. Cdendro package version, v. 7, 2014.

LEBOURGEOIS, François; COUSSEAU, Guillaume; DUCOS, Yves. Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Bercé ("Futaie des Clos", Sarthe, France). *Annals of forest science*, v. 61, n. 4, p. 361-372, 2004.

LEMOS, Jesus Rodrigues; MEGURO, Marico. Estudo fitossociológico de uma área de Caatinga na Estação Ecológica (ESEC) de Aiuaba, Ceará, Brasil. *Biotemas*, v. 28, n. 2, p. 39-50, 2015.

LINDZEN, Richard S.; NIGAM, Sumant. On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 44, n. 17, p. 2418-2436, 1987.

LÓPEZ, L.; VILLALBA, R. Reliable estimates of radial growth for eight tropical species based on wood anatomical patterns. *Journal of Tropical Forest Science*, p. 139-152, 2016.

LÓPEZ, Lidio; VILLALBA, Ricardo; STAHL, David. High-fidelity representation of climate variations by *Amburana cearensis* tree-ring chronologies across a tropical forest transition in South America. *Dendrochronologia*, v. 72, p. 125932, 2022.

LORENZI, Harri. *Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil: árvores brasileiras*. Nova Odessa: Plantarum, 1992.

MARENGO J.A; CHOU S.C; TORRES R.R; GIARO LLA A; ALVES L.M; LYRA A. Climate Change in Central and South America: Recent Trends, Future Projections, and Impacts on Regional Agriculture. CCAFS Working Paper no. 73. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). 2014. Copenhagen, Denmark. Disponível online em: <https://ccafs.cgiar.org/>

MARENGO, José A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*, v. 1, p. 385-422, 2011.

MARENGO, Jose A.; VALVERDE, Maria C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência*, v. 8, n. 1, p. 5-28, 2007.

MAXWELL, R. Stockton; LARSSON, Lars-Ake. Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application. *Dendrochronologia*, v. 67, p. 125841, 2021.

MCPHADEN, Michael J. Genesis and evolution of the 1997-98 El Niño. *Science*, v. 283, n. 5404, p. 950-954, 1999.

MORAIS, Adão Barros de. *Dinâmica sucessional em Floresta Tropical Sazonalmente Seca na Estação Eológica de Aiuaba, Ceará*. 2019.

MORO, Marcelo Freire et al. A phytogeographical metaanalysis of the semiarid Caatinga domain in Brazil. *The Botanical Review*, v. 82, n. 2, p. 91-148, 2016.

OLDFIELD, S.; LUST, C.; MACKINVEN, A. *The World List of Threatened Trees*. Cambridge, UK: World Conservation Press, 1998. 650 p.

PEREIRA, Marcos Paulo Santos et al. The influence of oceanic basins on drought and ecosystem dynamics in Northeast Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 9, n. 12, p. 124013, 2014.

PIAO, Shilong et al. Interannual variation of terrestrial carbon cycle: Issues and perspectives. *Global Change Biology*, v. 26, n. 1, p. 300-318, 2020.

PIETRAS, Justyna et al. Oak sprouts grow better than seedlings under drought stress. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, v. 9, n. 4, p. 529, 2016.

POORTER, Lourens et al. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, v. 530, n. 7589, p. 211-214, 2016.

PRADO, Hélio do. *Manejo dos solos: descrições pedológicas e suas implicações*. São Paulo: Nobel, 1991.

RIEGELHAUPT, E. et al. O manejo florestal na caatinga: resultados da experimentação. GARIGLIO, MA et al. Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga. Brasília, p. 256-275, 2010.

ROBERTSON, Tim et al. The GBIF integrated publishing toolkit: facilitating the efficient publishing of biodiversity data on the internet. *PloS one*, v. 9, n. 8, p. e102623, 2014.

RYBNÍČEK, Michal et al. Exploring growth variability and crown vitality of sessile Oak (*Quercus petraea*) in the Czech Republic. *Geochronometria*, v. 42, n. 1, p. 17-27, 2015.

SANTOS, Severino do Ramo Nascimento dos et al. *Fenologia e propagação de Amburana cearensis (Arr. Cam.) AC Smith*. 2014.

SCHÖNGART, Jochen. Growth-oriented logging (GOL): the use of species-specific growth information for forest management in central Amazonian floodplains. In: *Amazonian Floodplain Forests*. Springer, Dordrecht, 2010. p. 437-462.

SELEME, E.P. 2020. *Amburana in Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB22781>>. Accessed 10 November 2022.";

SOUZA, Bartolomeu Israel de; ARTIGAS, Rafael Cámara; LIMA, Eduardo Rodrigues Viana de. *Caatinga e desertificação*. Mercator (Fortaleza), v. 14, p. 131-150, 2015.

SPEER, James H. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Tucson: The University Of Arizona Press, 2012. 333 p.

STOJANOVIĆ, Marko et al. Forecasting tree growth in coppiced and high forests in the Czech Republic. The legacy of management drives the coming *Quercus petraea* climate responses. *Forest Ecology and Management*, v. 405, p. 56-68, 2017.

TEAM, R. Development Core. *A language and environment for statistical computing*. <http://www.R-project.org>, 2015.

"

TORRES, Roger Rodrigues; LAPOLA, David Montenegro; GAMARRA, Nancy Laura Rios. Future climate change in the Caatinga. In: *Caatinga*. Springer, Cham, 2017. p. 383-410;

TROUET, Valerie; VAN OLDENBORGH, Geert Jan. KNMI Climate Explorer: a web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Research*, v. 69, n. 1, p. 3-13, 2013.

WANG, Chunzai et al. El Niño and southern oscillation (ENSO): a review. *Coral reefs of the eastern tropical Pacific*, p. 85-106, 2017.

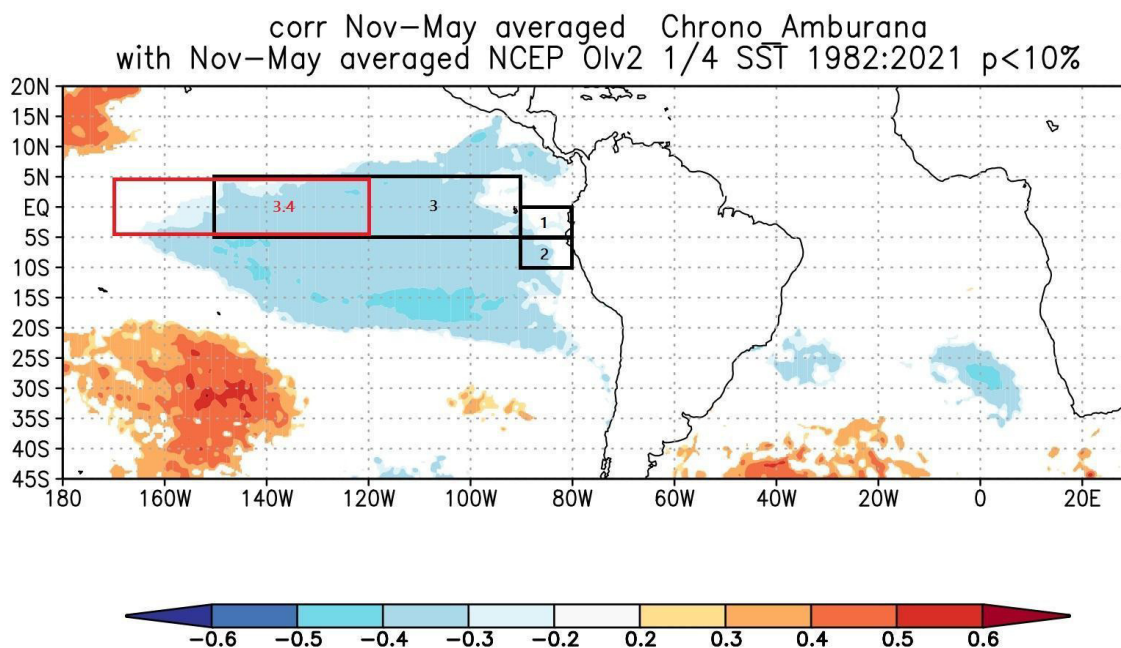
WILS, T. H. G. et al. Dendrochronology in the dry tropics: the Ethiopian case. *Trees*, v. 25, n. 3, p. 345-354, 2011.

XU, Liang et al. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. *Science Advances*, v. 7, n. 27, p. eabe9829, 2021.

ZUIDEMA, Pieter A. et al. Tropical tree growth driven by dry-season climate variability. *Nature Geoscience*, v. 15, n. 4, p. 269-276, 2022.

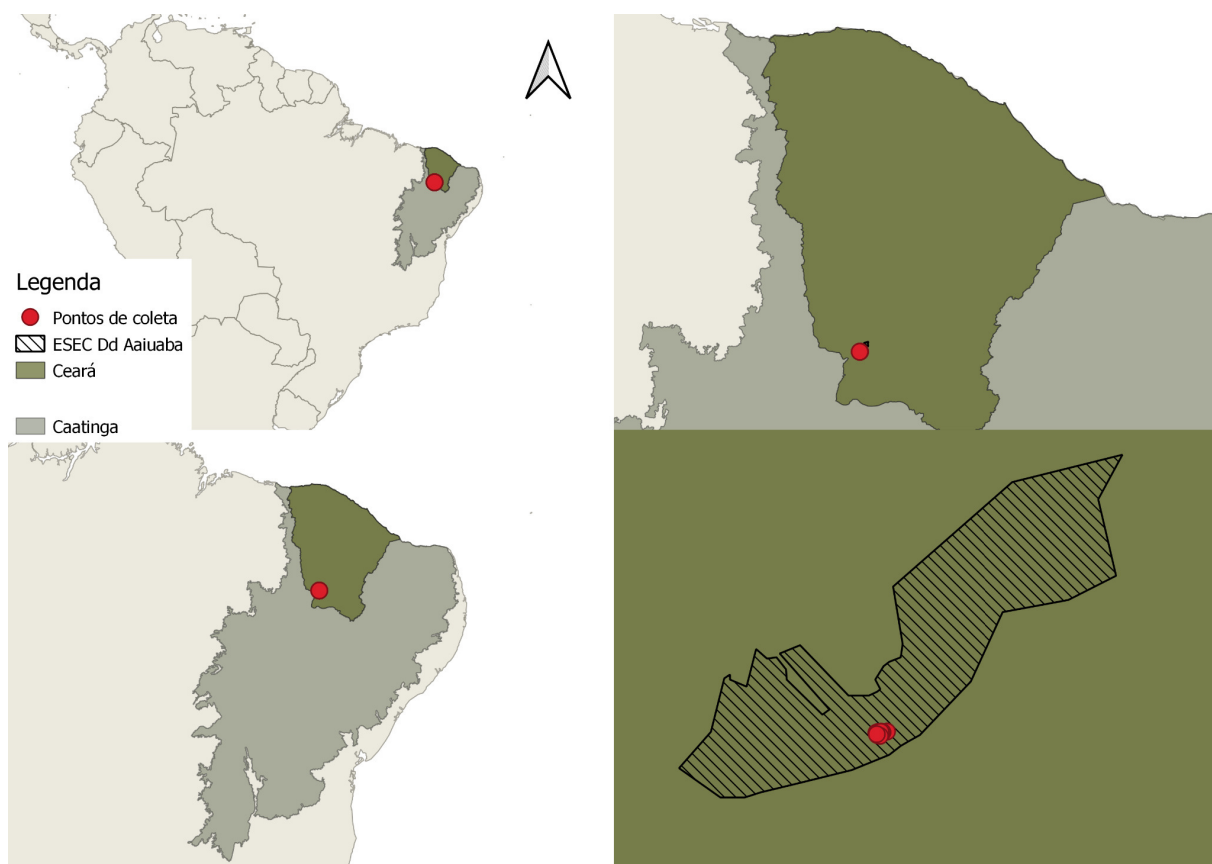
7. ANEXOS

7.1. Figura 1 - Mapa das zonas Niño 1, 2, 3 e 3.4 e de correlação espacial entre TSM e crescimento vegetal, baseado em amostras coletadas de populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil



Legenda - Mapa de correlações espaciais entre a cronologia do índice de largura de anel (RWI) de todas as árvores de *Amburana cearensis* coletadas na Estação Ecológica de Aiuaba e a Temperatura na Superfície do Mar (TSM) em áreas diagnósticas de ENSO (Niño 1, 2, 3 e 3.4) em meses de formação de ENSO (Novembro a Maio) nos anos de 1982 a 2021. Dados de grade das reconstruções de temperatura da superfície do mar de interpolação ótima de 0,25° do [Centro Nacional de Informações Ambientais](#) (NOAA) (Reynolds e Smith, 1994). As cores indicam os coeficientes de correlação de Pearson. O valor p calculado com base na área com correlação significativa é de: $p < 0.001$

7.2. Figura 2 - Mapa do Brasil, com destaque para a Caatinga, para o Ceará, para a ESEC de Aiuaba e para os pontos de coleta de *Amburana cearensis*



Mapa produzido em QGIS pelos autores mostrando a localização da Caatinga, da ESEC de Aiuaba e dos pontos de coleta das árvores de *A. cearensis*

**7.3. Figura 3 – Indivíduo de *Amburana cearensis* crescido após talhadia
Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil**



Foto de campo de indivíduo adulto de *A. cearensis* com evidência de talhadia (mais de um tronco a nível do solo e remanescente do possível tronco original da árvore que foi submetido a corte raso)

7.4. **Figura 4 - Árvore não-talhada de *Amburana cearensis*, Estação Ecológica de Aiuaba, município de Aiuaba, Ceará Brasil**



Foto de campo de indivíduo adulto de *A. cearensis* sem evidência de talhadia (apenas um tronco a nível do solo e ramificação muito acima de 1,20 m)

7.5. Figura 5 - Detalhes da vista frontal da broca utilizada para a coleta de amostras em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil



Vista frontal da broca oca de aço utilizada junto a um motor de dois tempos movido a gasolina para extrair amostras dendrocronológicas não-destrutivas

7.6. Figura 6 - Amostra dendrocronológica coletada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil



Foto de campo de amostra dendrocronológica ao lado da haste de madeira para fixação

7.7. Figura 7 - Coleta de amostra dendrocronológica na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil



Foto de campo de coleta dendrocronológica não-destrutiva sendo realizada na ESEC de Aiuaba

7.8. Figura 8 - Amostra fixada coletada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil



Foto de campo de amostra dendrocronológica já fixada

7.9. Figura 9 - Ficha de coleta Dendrocronológica para Silvicultura

Area: _____ Date:/...../..... By: _____

Data: ____/____/____ Parcela: _____ Por: _____

ID:			ID:		
Espécie:			Espécie:		
DAP:	Altura:		DAP:	Altura:	
DAA:	Fértil?		DAA:	Fértil?	
Linha:	Árvore:		Linha:	Árvore:	
GPS:			GPS:		
Amostras 5mm:	15mm:	Disco:	Amostras 5mm:	15mm:	Disco:
Observações / Desenho:			Observações / Desenho:		

ID:			ID:		
Espécie:			Espécie:		
DAP:	Altura:		DAP:	Altura:	
DAA:	Fértil?		DAA:	Fértil?	
Linha:	Árvore:		Linha:	Árvore:	
GPS:			GPS:		
Amostras 5mm:	15mm:	Disco:	Amostras 5mm:	15mm:	Disco:
Observações / Desenho:			Observações / Desenho:		

Exemplo da ficha de campo utilizada em coletas dendrocronológicas em florestas plantadas

- 7.10. **Figura 10 - Vista frontal da amostra lixada no suporte de coleta realizada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil**



Foto dos autores

- 7.11. **Figura 11 - Amostra da vista transversal do caule coletada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil**



Foto dos autores

- 7.12. **Figura 12 - Imagem produzida com a scanner a partir da amostra coletada em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil**



Imagem de alta resolução produzida em *scanner*

7.13. Figura 13 - Detalhes das estruturas indicadores de anel de crescimento da amostra escaneada resultante da coleta em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil

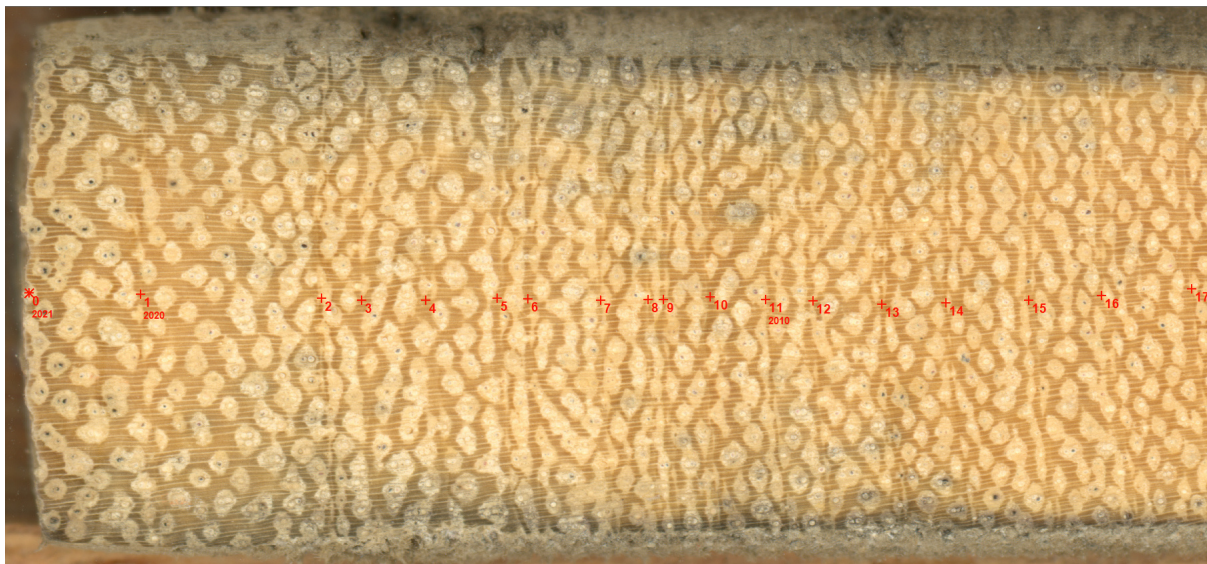
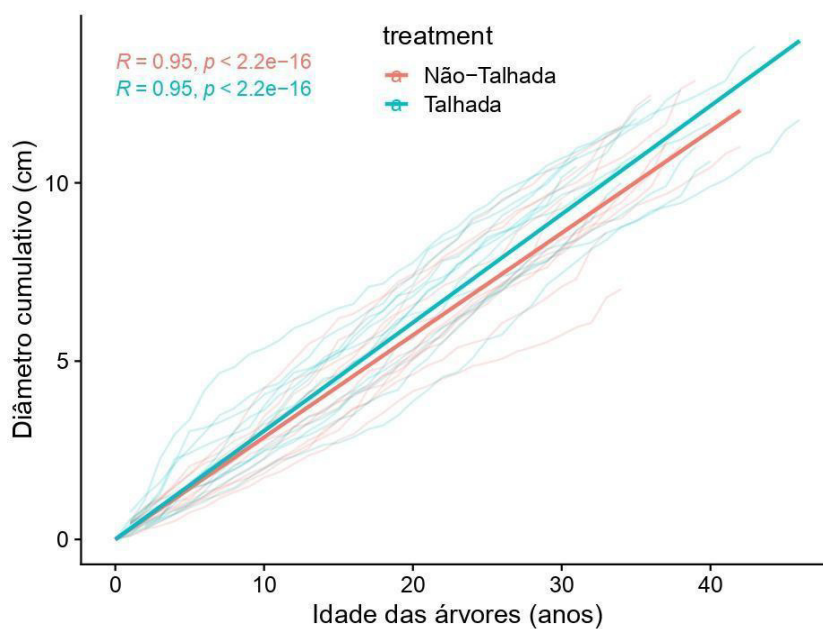


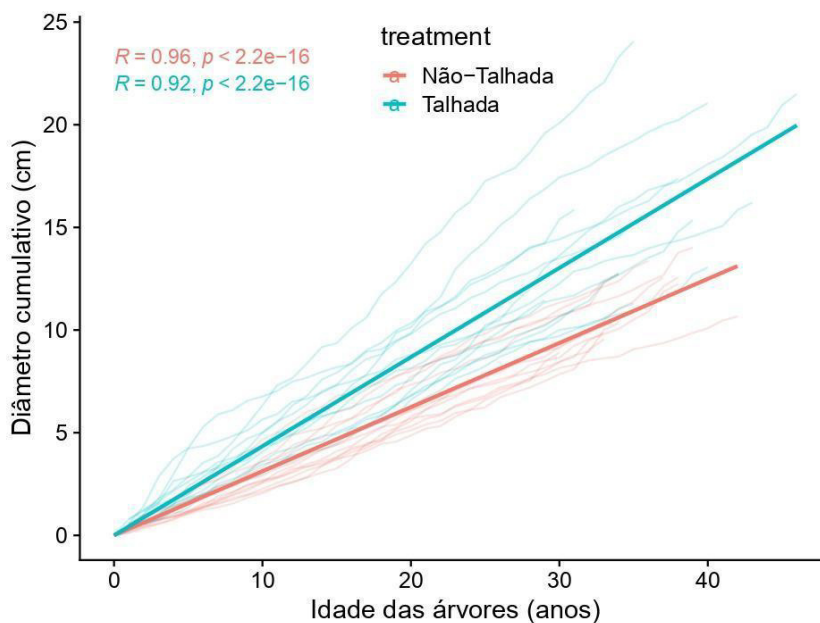
Imagem com as marcações e datações feitas em cada anel para a obtenção das medidas de largura dos anéis anuais de crescimento.

7.14. **Figura 14 - Diferenças diâmetro/idade do tronco principal dos indivíduos amostrados em populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil**



Legenda - Diâmetro cumulativo do tronco coletado das árvores de acordo com a sua idade estimada. Cada linha em azul-claro representa a curva de crescimento de uma árvore talhada, enquanto a linha em azul representa a curva de crescimento média do grupo de árvores talhadas. Cada linha em vermelho-claro representa a curva de crescimento de uma árvore não-talhada, enquanto a linha vermelha representa a curva de crescimento média do grupo de árvores não-talhadas. Valores estatísticos de R através da metodologia descrita no trabalho.

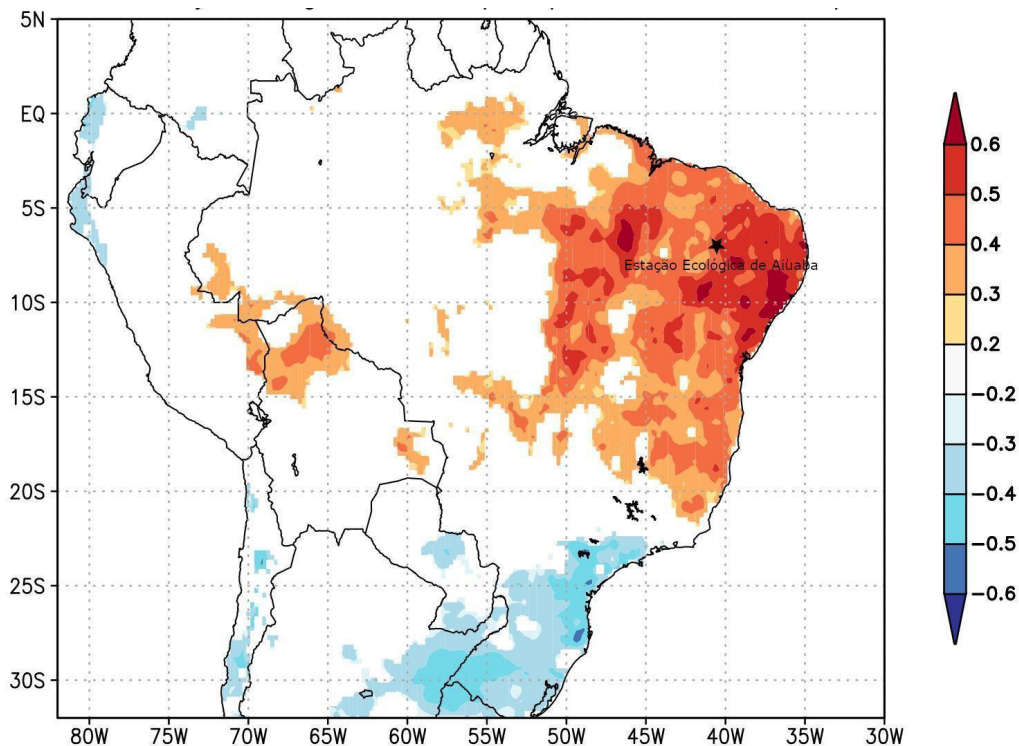
7.15. Figura 15 - Diferenças diâmetro/idade de todos os troncos dos indivíduos amostrados de populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil



Legenda - Crescimento das plantas considerando todos os troncos das árvores talhadas.

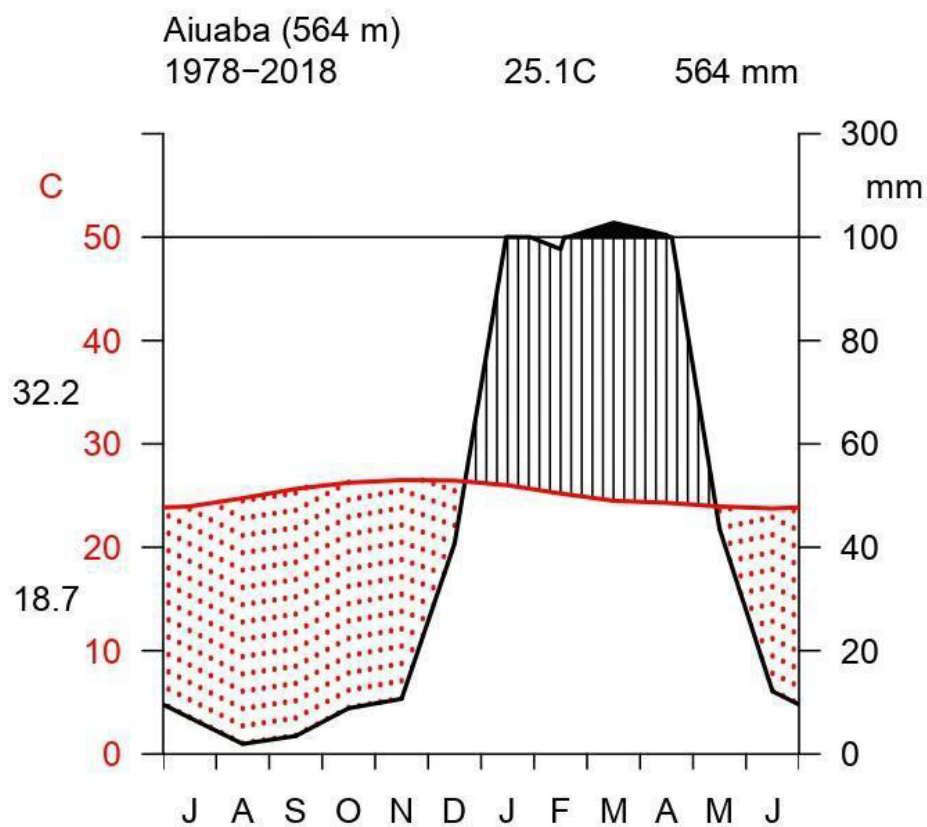
Diâmetro cumulativo estimado de todos os troncos medidos e coletados das árvores de acordo com a sua idade estimada. Cada linha em azul-claro representa a curva de crescimento de uma árvore talhada, enquanto a linha em azul representa a curva de crescimento média do grupo de árvores talhadas. Cada linha em vermelho-claro representa a curva de crescimento de uma árvore não-talhada, enquanto a linha vermelha representa a curva de crescimento média do grupo de árvores não-talhadas. Valores estatísticos de R através da metodologia descrita no trabalho.

7.16. Figura 16 - Mapa de correlação espacial entre precipitação e crescimento vegetal de populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil



Legenda - Mapa de correlações espaciais entre a cronologia do índice de largura de anel (RWI) de todas as árvores de *Amburana cearensis* coletadas na Estação Ecológica de Aiuaba e a precipitação no período chuvoso (Novembro a Maio) nos anos de 1982 a 2021 na superfície terrestre quadriculada. Dados de grade das reconstruções de precipitação de interpolação ótima de 0,25° do “[Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations](#)” (CHIRPS) (FUNK, 2015). As cores indicam os coeficientes de correlação de Pearson. O valor p calculado com base na área com correlação significativa é de: $p < 0.001$

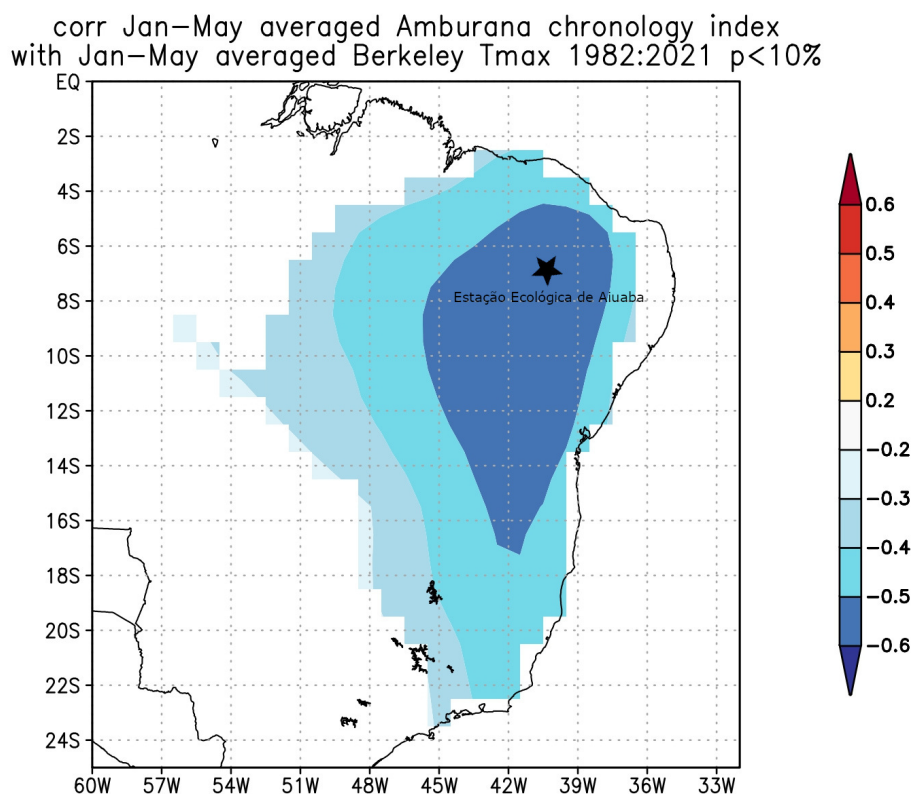
7.17. **Figura 17 - Distribuição mensal média das chuvas na sede da Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil**



figura

Legenda - Balanço hídrico do Município produzido pelos autores no R com base nos dados mensais de precipitação disponíveis no site da [Funceme](#)

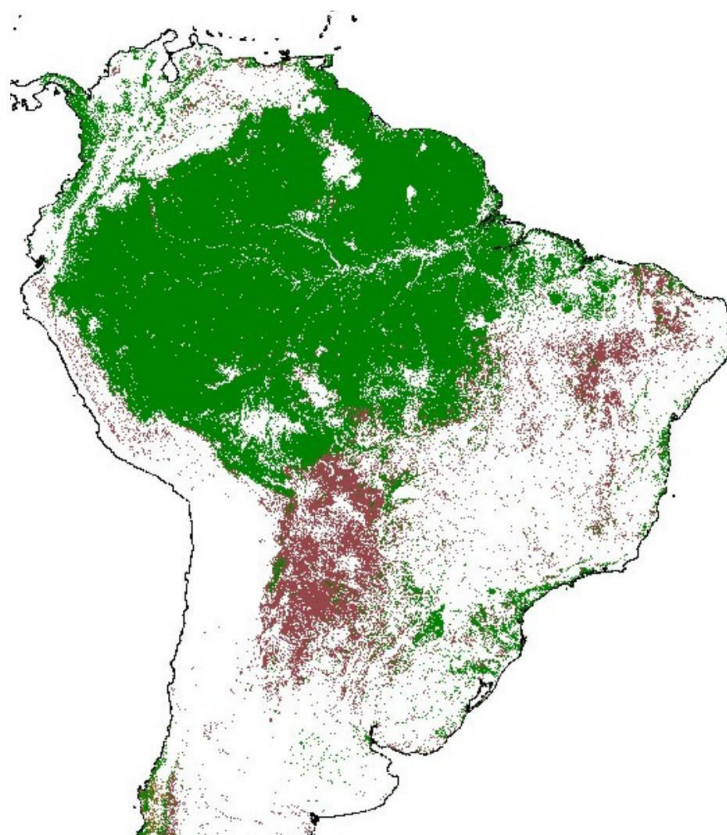
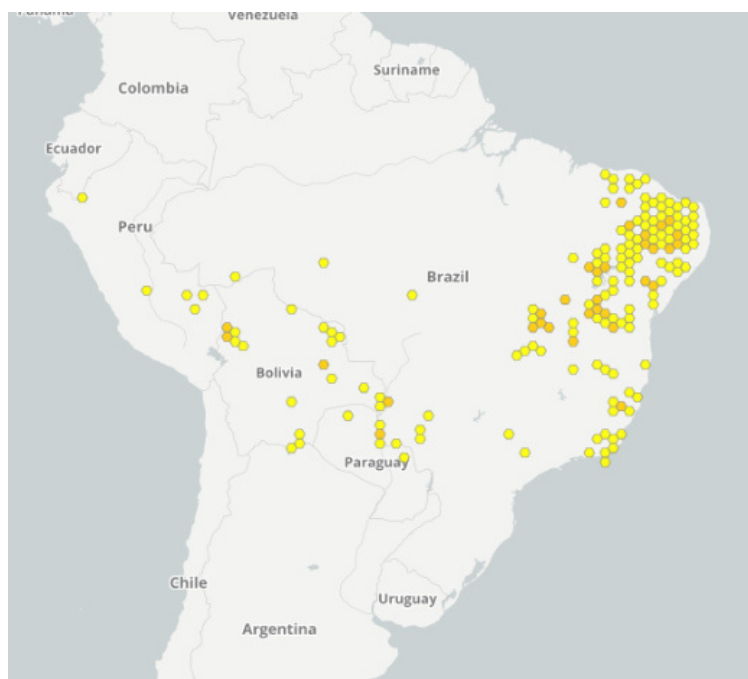
7.18. Figura 18 – Mapa de correlação espacial entre temperatura máxima na estação chuvosa e crescimento vegetal, baseado em amostras coletadas de populações de *Amburana cearensis* na Estação Ecológica de Aiuaba e seus arredores, município de Aiuaba, Ceará Brasil



Legenda - Mapa de correlações espaciais entre a cronologia do índice de largura de anel (RWI) de todas as árvores de *Amburana cearensis* coletadas na Estação Ecológica de Aiuaba a temperatura máxima em parte do período chuvoso (Janeiro a Maio) nos anos de 1982 a 2021 na superfície terrestre quadriculada. Dados de grade das reconstruções de precipitação de interpolação ótima de 1° do “[Berkeley Earth](#)”. As cores indicam os coeficientes de correlação de Pearson. O valor p calculado com base na área com correlação significativa é de:

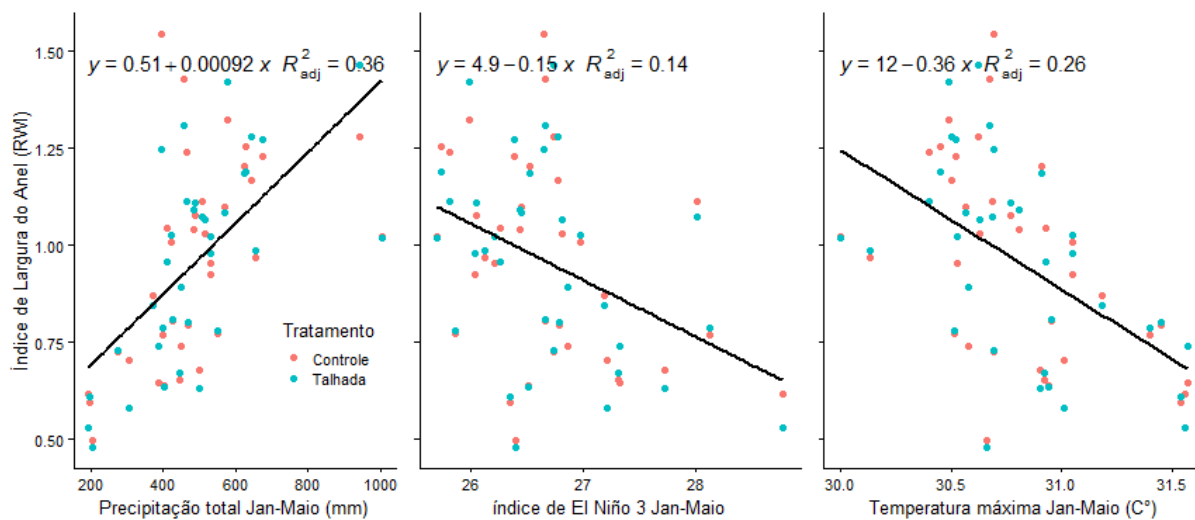
$$p < 0.001$$

7.19. Figura 19 - Mapa da Área de Ocorrência de *A. cearensis* na América do Sul baseado em dados do GBIF (<https://www.gbif.org/species/2945821>)



Legenda - Área de ocorrência de *A. cearensis* concatenado pelos autores no GBIF (acima) em contraste com o mapa da distribuição de florestas secas na América do Sul extraído do trabalho de EVA (2002)

7.20. Figura 20 - Gráficos de regressões lineares mostrando as correlações entre o RWI e as variáveis climáticas sob análise (precipitação, à esquerda; índice de El Niño, ao centro e temperatura máxima, à direita).



Legenda - Gráficos de regressões lineares mostrando as correlações entre o RWI e as variáveis climáticas sob análise (precipitação, à esquerda; índice de El Niño, ao centro e temperatura máxima, à direita). Dados obtidos a partir das plataformas indexadas no Climexp como referência para cada viável.