



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E GESTÃO DE RECURSOS
NATURAIS

MATEUS DE OLIVEIRA SILVA

POTENCIAL DENDROCRONOLÓGICO E RELAÇÕES CLIMA-CRESCIMENTO
EM ESPÉCIES DE MANGUEZAL

FORTALEZA

2026

MATEUS DE OLIVEIRA SILVA

POTENCIAL DENDROCRONOLÓGICO E RELAÇÕES CLIMA-CRESCIMENTO EM
ESPÉCIES DE MANGUEZAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, do Centro de Ciências, do Departamento de Biologia, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Recursos Naturais. Área de concentração: Ecologia Terrestre

Orientador: Prof. Dr. Rafael Carvalho da Costa
Coorientador: Dr. José Roberto Vieira Aragão

FORTALEZA

2026

MATEUS DE OLIVEIRA SILVA

POTENCIAL DENDROCRONOLÓGICO E RELAÇÕES CLIMA-CRESCIMENTO EM
ESPÉCIES DE MANGUEZAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, do Centro de Ciências, do Departamento de Biologia, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Recursos Naturais. Área de concentração: Ecologia Terrestre.

Aprovada em 23/02/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rafael Carvalho da Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. José Roberto Vieira Aragão (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Mariana Alves Pagotto
Universidade Federal de Sergipe (UFSE)

Prof. Dr. Peter Stoltenborg Groenendyk
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

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

AGRADECIMENTOS

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

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto Restaura Cocó, implementado pela Secretaria do Meio Ambiente e Mudança do Clima do Ceará (SEMA) e Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP).

Ao Prof. Dr. Rafael Carvalho da Costa, pela orientação e prestatividade ao longo do trabalho.

Ao Dr. José Roberto Vieira Aragão, pela coorientação e pelas contribuições críticas ao desenvolvimento do trabalho.

À Profa. Dra. Anna Abrahão pela excelente coordenação do Projeto Restaura Cocó.

Aos professores participantes da Banca examinadora, Dra. Mariana Alves Pagotto e Dr. Peter Stoltenborg Groenendyk, pelas críticas e sugestões que contribuíram para a melhoria do trabalho.

Ao colega pesquisador Sandro Ferreira do Nascimento, pelas contribuições durante as análises dos limites de crescimento e por toda a colaboração.

Ao colega pesquisador Gustavo de Sousa Linhares pela prestatividade e auxílio técnico durante o preparo das amostras.

Aos servidores do PEC, Edson e Martins, pelo trabalho fundamental durante a coleta das amostras.

RESUMO

Os manguezais, ecossistemas essenciais, são ameaçados por distúrbios antropogênicos e pelas mudanças climáticas. Compreender como esses fatores alteram o crescimento de espécies arbóreas é crucial para entender suas fragilidades e guiar estratégias de conservação. Nosso trabalho buscou avaliar efeitos do clima local, de teleconexões e de distúrbios no crescimento anual de espécies arbóreas do Parque Estadual do Cocó (PEC). A ferramenta utilizada no estudo foi a dendrocronologia, aplicada para construir cronologias de crescimento anual de *Laguncularia racemosa* (L.) C.F. Gaertn. (Combretaceae) e *Avicennia germinans* (L.) L (Acanthaceae) afetadas por um incêndio ocorrido em 2024 no PEC. Constatou-se a delimitação de anéis de crescimento anuais apenas para *L. racemosa*, possibilitando construir sua cronologia de crescimento e, com isso, investigar os efeitos de variáveis climáticas locais (precipitação e temperatura), globais (temperatura da superfície do Oceano Atlântico Norte – TAN, e eventos de *El Niño*), e a influência de distúrbios antrópicos anteriores. Os resultados mostram um crescimento síncrono na população de *L. racemosa* que responde sensivelmente ao clima. O crescimento se correlaciona com a precipitação (+) e com a temperatura do ar local (-) principalmente na estação seca. O elemento macroclimático que influencia o crescimento é a TAN, que influencia negativamente a precipitação local. Não foi encontrada influência das oscilações do *El Niño*. Apesar de haver marcas de carvão no xilema de algumas árvores, não observou-se um padrão de influência do fogo no crescimento. Este estudo demonstra a sensibilidade de *L. racemosa* a fatores climáticos que influenciam a disponibilidade hídrica local. Os resultados reforçam a vulnerabilidade dos manguezais a mudanças no regime pluvial e a necessidade de integrar a restauração hidrológica em projetos de conservação, especialmente no contexto de aumento das temperaturas globais.

Palavras-chave: anéis de crescimento; mangue; teleconexões climáticas; distúrbios antrópicos.

ABSTRACT

Mangroves, essential ecosystems, are threatened by anthropogenic disturbances and climate change. Understanding how these factors alter the growth of tree species is crucial for comprehending their vulnerabilities and guiding conservation strategies. Our study aimed to assess the effects of local climate, teleconnections, and disturbances on the annual growth of species in the Parque Estadual do Cocó (PEC). The tool used in the study was dendrochronology, applied to construct the annual growth chronology of *Laguncularia racemosa* and *Avicennia germinans* affected by a fire in the PEC in 2024. The delimitation of annual growth rings was established for *L. racemosa*, allowing the construction of its growth chronology and, with it, the investigation of the effects of local climate variables (precipitation and temperature), global ones (North Atlantic Ocean Sea Surface Temperature - TNA, and El Niño events), and the influence of previous anthropogenic disturbances. The results show synchronous growth in the *L. racemosa* population, which responds sensitively to climate. Growth correlates with precipitation (+) and local air temperature (-), mainly during the dry season. The macroclimatic element influencing growth is TNA, which negatively influences local precipitation. No influence from El Niño oscillations was found. Despite the record of previous fires in the samples, no pattern of fire influence on growth was observed. This study demonstrates the sensitivity of *L. racemosa* to climatic factors influencing water availability and highlights that anthropogenic disturbances have long-lasting effects on the species' growth in the area. The results reinforce the vulnerability of mangroves to changes in rainfall regimes and the need to integrate hydrological restoration into conservation projects, especially in the context of rising global temperatures.

Keywords: growth rings; mangrove; climate teleconnections; anthropogenic disturbances.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	MÉTODOS	11
2.1	Local de estudos.....	11
2.2	Espécie de estudos.....	13
2.3	Dados climáticos.....	13
2.4	Construção da cronologia de crescimento.....	14
2.5	Análises de dados.....	15
3	RESULTADOS	17
3.1	Limite da zona de crescimento.....	17
3.2	Cronologia.....	18
3.3	Correlações do clima com o crescimento.....	19
3.4	Correlações macroclimáticas.....	22
3.5	Influência de perturbações e desvios de crescimento.....	23
4	DISCUSSÃO	24
4.1	Limites dos anéis de crescimento.....	25
4.2	Cronologia do crescimento.....	25
4.3	Influência de fatores climáticos locais.....	26
4.4	Teleconexões do Atlântico Norte.....	27
4.5	Desvios de crescimento.....	28
5	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS	31
	APÊNDICE A – ROTINA DE SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS CLIMÁTICOS	37

1 INTRODUÇÃO

Os manguezais são ecossistemas costeiros típicos de zonas tropicais e subtropicais, caracterizados por uma vegetação que apresenta adaptações às condições oscilantes de salinidade, substrato inconsolidado e anoxia (ALMEIDA; COELHO JUNIOR, 2018). Por estarem localizados em áreas costeiras, os seus condicionantes normalmente estão associados diretamente ao ciclo de marés, havendo eventos de inundação diários com aporte de água salgada (LEAL; SPALDING, 2024). Dessa forma, os manguezais possuem feições distintas conforme a influência das faixas de maré (mais altas ou baixas) (ALMEIDA; COELHO JUNIOR, 2018). Essa variação também ocorre no interior das feições, como no bosque de mangue, caracterizado pela distribuição de espécies de árvores ao longo do gradiente de influência das marés (ALMEIDA; COELHO JUNIOR, 2018).

O estresse trazido constantemente pela salinidade das marés impõe sobre essas espécies um dilema: preservação de água ou manutenção de fotossíntese, com estudos apontando os efeitos negativos nas taxas fotossintéticas e conseqüentemente no crescimento de espécies de mangue (PARIDA; MITTRA, 2003; PERRI et al., 2018; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ et al., 2018). Essa presença constante de sais em concentrações elevadas representa para as plantas uma demanda energética necessária à manutenção dos mecanismos fisiológicos de excreção de excesso de sais e de osmorregulação para evitar danos (ROBERT et al., 2009a; TAN et al., 2013; PERRI et al., 2018). Esses efeitos são observados também em características funcionais, afetando com isso a distribuição espacial das espécies que não possuem plasticidade de traços para lidar com o estresse (LEONG et al., 2018; MOYA et al., 2024; ROBERT et al., 2009a) e a própria estrutura da vegetação (PERRI et al., 2022). Além disso, existe um estresse associado à falta de oxigenação das raízes, seja pelos períodos frequentes de inundação ou pelo soterramento por depósito de sedimentos (OKELLO et al., 2020). Em espécies que desenvolvem pneumatóforos, o soterramento por sedimento com baixa oxigenação impulsiona o desenvolvimento dessas estruturas radiculares, que crescem em maior densidade e altura em resposta à anoxia, representando um gasto de biomassa em função desse estresse (AL-KHAYAT; ALATALO, 2021). Analogamente, a mesma resposta ocorre em espécies que desenvolvem raízes escoras ou raízes “joelhos”, demonstrando a plasticidade de espécies de manguezal, mas também o investimento em biomassa subterrânea

necessário para lidar com as condições inóspitas, em detrimento da porção aérea (OKELLO *et al.*, 2019; SAINTLAIN, 1997).

Tais elementos de estresse são modulados principalmente pelo aporte de água doce oriundo de precipitação no local ou a montante do rio, quando se formam as descargas de água doce no estuário, alterando as condições de salinidade do ecossistema (ROBERT *et al.*, 2009b). O principal efeito da disponibilidade de água doce para as árvores de manguezal é a diluição da salinidade, o que alivia o estresse fisiológico e favorece janelas de crescimento da porção aérea (HAYES *et al.*, 2019; RAHMAN *et al.*, 2020). Portanto, a precipitação local é um fator importante para as dinâmicas de salinidade que regulam o crescimento de árvores de manguezal (CHOWDHURY *et al.*, 2016). Dessa forma, eventos macroclimáticos, como *El Niño/La niña*, que atuam sobre o clima local, especialmente na pluviosidade, também são potenciais agentes de modulação do crescimento dessas espécies (CHOWDHURY *et al.*, 2023b; MAXWELL; HARLEY; RAHMAN, 2018). Com a atual realidade do avanço das mudanças climáticas, os manguezais outrora vistos como resilientes e mitigadores passam a ter suas funções ecológicas ameaçadas pelo aumento da intensidade e da velocidade com que essas mudanças ocorrem (ALONGI, 2008; KOH *et al.*, 2018). O aumento do nível do mar, das temperaturas e a redução da precipitação podem afetar negativamente o crescimento, o recrutamento e a produtividade nesses ecossistemas (FRIESS *et al.*, 2022), uma vez que variáveis climáticas são um importante modulador da capacidade de produção de biomassa nesses ecossistemas (XIONG *et al.*, 2019)

Aliado a isso, os manguezais são ecossistemas que sofrem uma multiplicidade de ameaças humanas que afetam seu crescimento e desenvolvimento, dada a coincidência de sua localização em regiões que, por serem litorâneas, são intensamente afetadas pelo desenvolvimento costeiro (construção de resorts, usinas de dessalinização, usinas de geração de energia, instalações portuárias, docas, expansão de áreas urbanas, expansão da aquicultura e agricultura, e exploração de madeira) (AKRAM *et al.*, 2023, LEÃO *et al.* 2018). Esses distúrbios causam uma multiplicidade de efeitos que vão desde a conversão intensa e total de manguezais em formas de uso da terra, até distúrbios crônicos que aos poucos alteram a estrutura e funcionamento do ecossistema, reduzindo globalmente a área ocupada por essas vegetações (LEAL; SPALDING, 2024). Portanto, distúrbios antropogênicos e alterações climáticas globais podem afetar a hidrologia dos ecossistemas e, com isso, alterar os níveis de salinidade no manguezal, limitando tanto crescimento e reprodução quanto às zonas de

ocupação de suas espécies (AHMED *et al.*, 2022; AHMED *et al.*, 2023; CHOWDHURY *et al.*, 2024; LEONG *et al.*, 2018; FRIESS *et al.*, 2022; RAHMAN *et al.*, 2025).

Apesar de contraintuitivo, incêndios florestais em bosques de mangue são comuns; causados em sua maioria pela combinação de eventos de seca e agentes antrópicos. O fogo encontra um ambiente rico em biomassa e carbono no solo (DOOKIE *et al.*, 2025). Seus impactos negativos podem ser duradouros e demandar anos de esforço para recuperação da vegetação perdida (DARMAWAN *et al.*, 2020). Compreender esses impactos e o nível resiliência dos manguezais diante deles demanda, portanto, a compreensão da resposta da vegetação no longo prazo.

A compreensão da influência que tais estressores exercem sobre o crescimento de espécies arbóreas demanda o desenvolvimento de séries de dados temporais longas (CHOWDHURY *et al.*, 2023a). Nesse contexto, a dendrocronologia se insere como uma ferramenta importante em estudos de ecologia, possibilitando capturar as longas séries temporais dos fatores que influenciam o crescimento de espécies arbóreas (SPEER, 2010). Estudos recentes indicam que a formação de anéis de crescimento em espécies de manguezal está fortemente associada à variação intra-anual da precipitação e, conseqüentemente, da salinidade (MENEZES, *et al.*, 2003; CHOWDHURY *et al.*, 2008). Diante disso, em manguezais onde há sazonalidade dos fatores limitantes ao crescimento (ROBERT *et al.*, 2011), investigações sobre o potencial dendrocronológico de espécies arbóreas têm se tornado mais frequentes (CHOWDHURY *et al.*, 2016a; ESTRADA *et al.*, 2006). Esses trabalhos abriram caminho para a construção de cronologias que possibilitaram a investigação da influência de fatores climáticos locais (CHOWDHURY *et al.*, 2016b; CHOWDHURY *et al.*, 2023a; CHOWDHURY *et al.*, 2024; RAHMAN *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2016) e globais (CHOWDHURY *et al.*, 2023b; MAXWELL; HARLEY; RAHMAN, 2018) sobre o crescimento de árvores de mangue. No entanto, ainda são escassas pesquisas de longo prazo que se utilizam de anéis para entender a variação espaço-temporal do crescimento das espécies de mangue (ROBERT *et al.*, 2011), fragilizando o conhecimento que temos sobre a sensibilidade dessas vegetações às variáveis climáticas.

Este trabalho se propõe a investigar quais são os efeitos do clima e de distúrbios no crescimento de árvores de manguezal. Em janeiro de 2024, um incêndio de grandes proporções afetou o Parque Estadual do Cocó (PEC), em Fortaleza, CE, afetando uma área (18 hectares) predominantemente ocupada por vegetação de manguezal em regeneração após

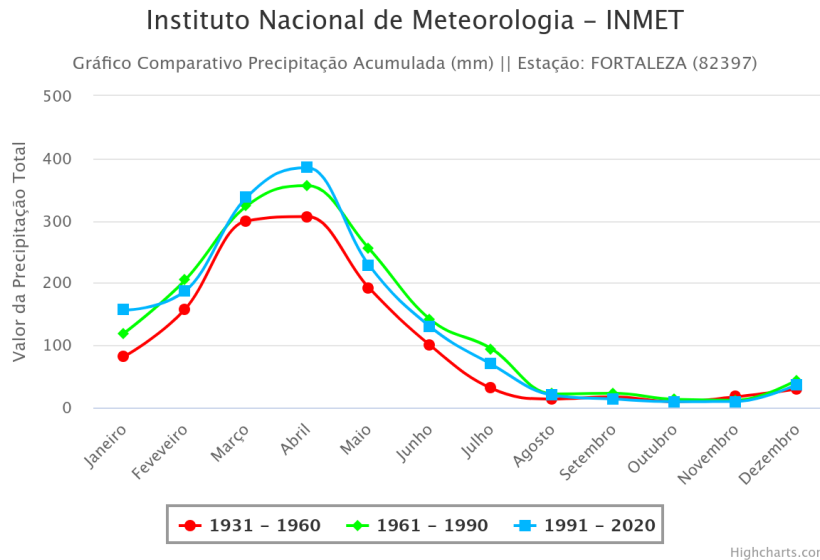
a desativação de salinas das décadas de 60/70 (ABRAHÃO, 2025). A partir da oportunidade de obter discos das árvores mortas no incêndio, objetivamos construir cronologias para as duas espécies afetadas no PEC e, com isso, investigar temporalmente os efeitos do clima e de distúrbios locais no crescimento de *Laguncularia racemosa* (L.) C.F.Gaertn. (Combretaceae) e *Avicennia germinans* (L.) L (Acanthaceae). Para isso, testamos as seguintes hipóteses: (1) O crescimento secundário está positivamente correlacionado com a precipitação local; (2) O crescimento secundário está negativamente correlacionado com as temperaturas locais; (3) Altas de temperatura nas superfícies dos oceanos Pacífico e Atlântico afetam negativamente o crescimento secundário; (4) Eventos de fogo afetam negativamente o crescimento secundário das árvores.

2 MÉTODOS

2.1 Local de estudos

A pesquisa foi desenvolvida no Parque Estadual do Cocó (PEC), localizado, em sua maior parte, no município de Fortaleza, Ceará, Brasil. O PEC é uma Unidade de Conservação estadual criada por meio do Decreto Estadual no 32.248/2017 e é cortado pelo Rio Cocó, que possui uma extensão de, aproximadamente, 42 quilômetros desde a nascente. O clima do PEC é considerado como tropical equatorial, com precipitação média anual de 1,584 mm, possuindo maiores índices pluviométricos no verão/outono (janeiro-junho), e com um período seco que dura em torno de seis meses (julho-dezembro) (PASQUINI, 2020) (Figura 1). O PEC é dividido em dois trechos que compreendem as seguintes Unidades Ambientais: Dunas, Planície Fluviomarinha, Planície e Terraço fluvial, Tabuleiro e Depressão (PASQUINI, 2020). A área que foi atingida pelo incêndio e, portanto, foi o local de coleta de dados deste estudo, situa-se no trecho 1 que tem altimetria variando de 0 a 20 metros de altitude em relação ao nível do mar, com as maiores altitudes correspondendo às dunas presentes na Zona de Amortecimento e no entorno (PASQUINI, 2020). No trecho 1, o rio sofre influência das marés, condicionando a predominância de manguezal na cobertura vegetal, havendo também, a ocorrência de campos salinos (apicum), vegetação de ambientes brejosos e paludosos, campos praianos, campos de dunas, floresta de dunas e carnaubal (PASQUINI, 2020).

Figura 1 - Precipitação acumulada mensal da cidade de Fortaleza. Curvas de médias mensais extraídas de períodos de 30 anos.



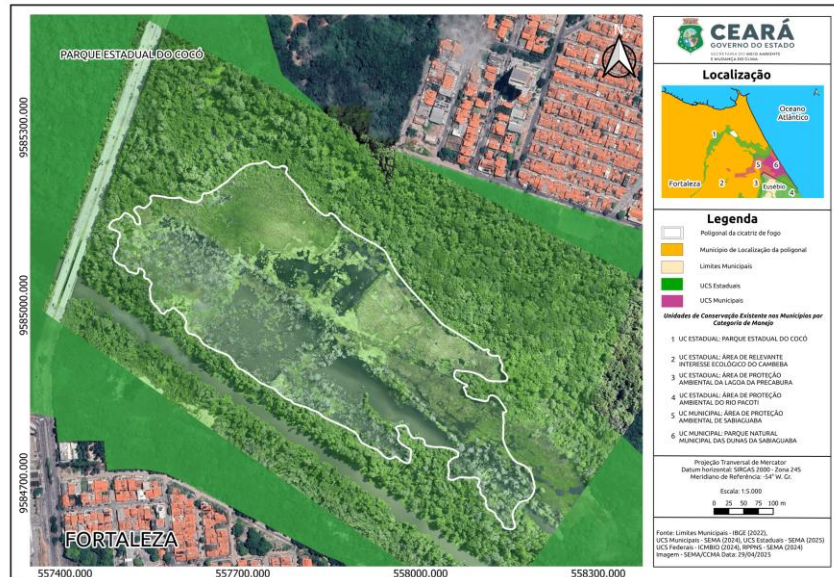
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Nota: Médias das séries históricas de 1931-1960 (vermelho), 1961-1990 (verde) e 1991-2020 (azul).

A área atingida pelo incêndio florestal (Figura 2) situa-se sob as coordenadas SIRGAS 2000 UTM 24S 9.585.061 N / 557.943 E (-3.754360, -38.478255), na margem esquerda (Norte) do Rio Cocó (baixo curso), tendo como referência espacial a proximidade com a Comunidade Barreiros e o bairro Cidade 2000. A área foi mapeada no plano de manejo do PEC como parte da Zona de Preservação (PASQUINI, 2020). A área diretamente atingida pelo incêndio e seu entorno compreendiam dois tipos de vegetação principais: floresta de Manguezal e Vegetação de Ambientes Brejosos e Paludosos. A vegetação dessa área é resultado da regeneração ocorrida após a desativação da Salina Diogo Siqueira que esteve ativa até o final da década de 70, em um local onde a influência marinha se faz presente por ocasião das variações da maré. A área de Manguezal, foco deste projeto, consiste em um bosque de árvores altas das espécies *Avicennia germinans* (L.) L. (Acanthaceae, Mangue-preto), *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae, Mangue-vermelho) e *Laguncularia racemosa* (L.) C.F. Gaertn. (Combretaceae, Mangue-branco), cuja cobertura geral das copas atinge alturas superiores a dez metros. Neste local, a grande maioria das árvores afetadas permaneceu de pé e suas folhas sofreram um ressecamento pelo calor do incêndio, não sofrendo, no entanto, queima direta, o que indicou que as chamas não atingiram grandes

alturas na vegetação de manguezal afetada. Assim, as árvores foram mortas pelo “fogo de chão” que se propagou através da matéria orgânica do solo.

Figura 2 – Área incendiada em janeiro de 2024, dentro do Parque Estadual do Cocó, na cidade de Fortaleza, Ceará.



Fonte: Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará (SEMA).

2.2 Espécies de estudos

Selecionamos as espécies *A. germinans* e *L. racemosa* para este estudo por ocorrerem na área afetada e serem espécies representativas dos manguezais tropicais, que, nas Américas, possuem baixo número de espécies (Moro 2025). Além disso, ambas espécies possuem caracterização anatômica dos seus limites de crescimento, com estudos apontando para o potencial de pesquisas dendrocronológicas para *L. racemosa* (ESTRADA *et al.*, 2006; MOYA *et al.*, 2024).

2.3 Dados climáticos

Os dados foram obtidos inicialmente da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME, 2025), nas estações mais próximas disponíveis (3-5 km) para a série histórica da cronologia (1999-2023). Entretanto, devido a uma série de anomalias nos dados de temperatura fornecidos (temperaturas muito acima ou abaixo do normal) e lacunas, optamos por utilizar os dados de grades do CRU TS v4 (HARRIS *et al.*, 2020) para a área (-3.754360, -38.478255) disponíveis no KNMI *climate explorer* (TROUET; VAN OLDENBORGH,

2013). Fizemos correlação entre os dados disponíveis de precipitação local das estações meteorológicas com os dados do KNMI para constatar o nível de proximidade e confiabilidade dos dados ($r = 0,86$, $p < 0,001$).

2.4 Construção da cronologia de crescimento

Coletamos 20 discos para cada espécie, buscando amostrar a amplitude de tamanhos que representa diferentes coortes da população na área. Os discos foram secados à temperatura ambiente, em casa de vegetação. Em seguida, foram polidos com lixas de granulação progressivamente mais fina (de 60 a 2000). A demarcação dos anéis de crescimento foi realizada em estereomicroscópio (com ampliação de 10 x a 40 x), e as amostras foram digitalizadas em scanner de mesa (EPSON Perfection V800 Photo) com resolução de 2400 dpi, gerando arquivos no formato ".tif". Os limites dos anéis de crescimento foram demarcados para cada espécie de acordo com suas características anatômicas específicas, servindo de base para a construção das cronologias (ARAGÃO *et al.*, 2022).

As larguras dos anéis foram medidas em 2-3 raios por disco e cruzadas visualmente utilizando o software CooRecorder (versão 9.4 para Windows; Cybis, 2020), com uma precisão de 0,01 mm e auxílio das curvas de correlação e do *skeleton plot* no CDendro. O controle estatístico da qualidade da datação cruzada foi realizado com o software COFECHA (HOLMES, 1983) para identificar e corrigir possíveis erros de marcação. A cronologia foi construída utilizando o pacote dplR (BUNN *et al.*, 2017) no software R versão 4.4.2 (R CORE TEAM, 2015). As séries radiais sincronizadas dentro e entre indivíduos das populações foram utilizadas para o cálculo do incremento radial anual e cumulativo. Realizamos a retirada de tendências (*detrending*) da série de raios utilizando um spline cúbico conservador de 65 anos (HUGHES; SWETNAM; DIAZ, 2011; SPEER, 2010) e iniciamos a construção da cronologia a partir da série de raios com a tendência retirada.

Como a estação chuvosa, principal indutor de crescimento em manguezais (XIONG *et al.*, 2019), está inserida inteiramente no ano do calendário na área (fevereiro-maio), não utilizamos o deslocamento de Schulman (SCHULMAN, 1956) na cronologia. Construímos então a cronologia *standard* que utilizamos como série média calculada a partir dos valores de Índice de Largura do Anel (RWI, do inglês Ring Width Index) de todos os raios e de onde obtivemos os seguintes parâmetros para a qualidade da série (HUGHES;

SWETNAM; DIAZ, 2011): a média de correlações inter-series intra-árvores (intercor); a correlação inter-séries entre as árvores (r_{bar}) e o Sinal Expresso pela População (EPS).

2.5 Análises de dados

Para avaliar as relações clima-crescimento e testar as hipóteses (1, 2 e 3), construímos inicialmente uma matriz de correlação de Pearson entre a cronologia obtida (valores de RWI) e variáveis climáticas locais (precipitação e temperatura) e macroclimáticas (temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico) que têm influência no crescimento de espécies tropicais (ARAGÃO *et al.*, 2019; SCHONGART *et al.*, 2017). Realizamos correlações com médias móveis das variáveis climáticas em janelas de 4-6 meses para capturar relações com o crescimento fora da estação chuvosa (estação ótima).

Tendo em vista que as espécies de manguezal podem ter resposta condicionada não somente aos totais anuais de variáveis climáticas, mas também aos valores em períodos críticos, como a estação seca, detalhamos a análise das relações clima-crescimento investigando as relações entre os valores mensais das variáveis climáticas e as respostas de crescimento da população através de modelos de regressão linear múltipla (HUGHES; SWETNAM; DIAZ, 2011; SPEER, 2010). Essas análises proporcionam uma visualização mais detalhada das relações entre as variáveis climáticas e a cronologia (ARAGÃO *et al.*, 2019; NOGUEIRA *et al.*, 2019). Os modelos de regressão linear múltipla foram ajustados tendo a cronologia (valores de RWI) como variável resposta e valores mensais (jan-dez) da série histórica (1999-2023) de precipitação local, temperatura local (mínimas, médias e máximas), índice de *El Niño* e temperatura superficial do atlântico norte como variáveis preditoras climáticas. Para identificar quais meses as variáveis climáticas influenciaram significativamente o crescimento radial, adotamos uma abordagem de seleção de modelos baseada no critério de informação de Akaike corrigido para pequenas amostras (AICc; Burnham & Anderson, 2002). A partir do modelo global contendo os valores das variáveis climáticas nos 12 meses do ano como preditores, realizamos uma busca exaustiva por todos os submodelos possíveis utilizando a função *dredge* do pacote MuMIn (Bartoń, 2025), totalizando 4096 modelos avaliados. Os modelos foram classificados pelo AICc, e aqueles com $\Delta AICc < 2$ em relação ao melhor modelo foram considerados igualmente plausíveis. Finalmente, os meses contidos nos modelos mais parcimoniosos foram utilizados para a construção do modelo final, a partir de uma abordagem *backward* entre os modelos

equivalentes de acordo com o AICc. O modelo final foi ainda comparado com o modelo completo (com todos os meses) e o modelo nulo (RWI constante) por ANOVA (Apêndice A). Com isso, geramos um modelo final significativo para cada variável climática testada (ver Apêndice A). Por fim, ajustamos um modelo geral, que incluiu os meses significativos das diferentes variáveis climáticas como preditores do RWI (Apêndice A).

Aprofundamos a análise das relações da temperatura nas superfícies dos oceanos Pacífico e Atlântico com o crescimento secundário (hipótese 3) através da construção de mapas de correlação utilizando a cronologia (valores de RWI) e a grade espacial de temperaturas do Atlântico Norte e do Pacífico por meio do KNMI.

A fim de compreender pontos de crescimentos fora do padrão e o efeito dos fogos anteriores registrados nas amostras (hipótese 4) (Figura 3), realizamos análises de anos ponteiros com janelas móveis (5 anos) utilizando o crescimento bruto, sem retirar as tendências, para cada raio/indivíduo (SCHWEINGRUBER *et al.*, 1990; VAN DER MAATEN-THEUNISSEN; VAN DER MAATEN; BOURIAUD, 2015). Essa análise considera que um ano está acima (60%) ou abaixo (40%) da média de crescimento se 75% dos raios analisados seguirem esta tendência de crescimento acima ou abaixo da média (SCHWEINGRUBER *et al.*, 1990). Todas as análises estatísticas foram realizadas no ambiente R (R CORE TEAM, 2015).

Figura 3 - Amostra de *L. racemosa* do PEC com registro de fogo antigo



Fonte: Os autores

3 RESULTADOS

3.1 Limite da zona de crescimento

Os limites das camadas de crescimento de *A. germinans* foram visíveis a olho nu, formando anéis de xilema alternados com camadas de floema, bem demarcadas (Figura 4). Entretanto, houve um desenvolvimento intenso de anastomose do câmbio, formando anéis labirínticos, com muitas convergências e divergências (Figura 4, setas brancas). Essa característica, junto à homogeneização anatômica dos limites divergentes no nível macroscópico, provou-se um impedimento para compreensão de quais árvores formam anéis de crescimento anuais verdadeiros, sendo impossível definir, com clareza, quais são anéis falsos por análise macroscópica. Dessa forma, não foi viável realizar a sincronização entre os raios de uma mesma amostra, passo inicial para desenvolvimento da sincronização dos indivíduos da população. Com isso, não foi possível construir cronologia para *A. germinans*.

Foi possível obter cronologias de crescimento secundário e portanto, relações clima-crescimento, para 12 árvores de *L. racemosa*. Os limites dos anéis de *L. racemosa* foram observáveis com lupa de aumento (10 x) e foram caracterizados pela presença de uma

faixa contínua de células de parênquima aliforme na margem de uma zona fibrosa muito discreta (Figura 4). Os anéis também apresentaram, de forma menos comum, a combinação de zonas fibrosas intercaladas com a presença de células de parênquima ou apenas a zona fibrosa (mais frequentemente próximo à medula). Também observamos a presença de anéis falsos, caracterizados pela descontinuidade das células delimitantes ou ainda pela confluência de dois ou mais limites.

Figura 4 - Digitalização após polimento dos discos das espécies *L. racemosa* e *A. germinans* no PEC, coletados e preparados para análises dendrocronológicas a partir de macroscopia.



Fonte: Os autores

Nota: Setas brancas indicam o processo comum de anastomose que ocorre em *A. germinans*. Setas pretas com linhas inteiras indicam anéis verdadeiros, com linhas pontilhadas indicam anéis falsos. Os algarismos identificam a amostra associada à imagem.

3.2 Cronologia

Realizar a datação cruzada de 12 indivíduos amostrados de *L. racemosa* (1999-2023) no PEC. Foram desconsiderados apenas os indivíduos com anomalias de crescimento muito grandes (quatro) e aqueles cuja sincronização com os demais não foi possível (três). Encontramos sincronia para a espécie, sendo indicada pela intercorrelação das séries nos indivíduos (0,624), pela intercorrelação entre indivíduos ($r_{\text{bar}} = 0,735$) e pelo Sinal Expresso pela População (EPS = 0,893) (Tabela 1). Ao todo, 33 raios foram utilizados na construção da

cronologia, sendo a idade máxima observada de 24 anos, com média de 14 anos para a população (Figura 5) (Tabela 1). A média de crescimento anual da população foi de $5,890 \pm 5,110$ mm.

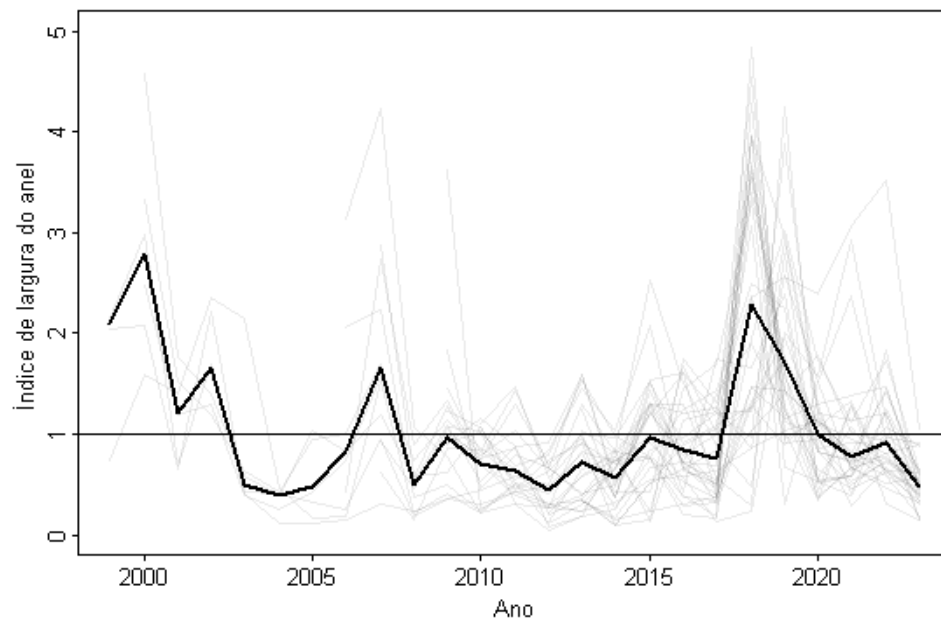
Tabela 1 - Características e métricas das populações e cronologia de *L. racemosa* e *A. germinans* no manguezal do Parque Estadual do Cocó (Ceará/Brasil).

Parâmetro	<i>L. racemosa</i>	<i>A. germinans</i>
Número de árvores (raios)	12 (33)	20
Diâmetro médio (máx) cm	16.2 (32)	20.6 (45.4)
Idade média (máx)	14 (24)	-
Período total	1999-2023	-
rbar	0.735	-
EPS	0.893	-
Sensibilidade média	0.631	-
Intercorrelação	0.624	-

Fonte: Os autores

Nota: Rbar: correlação inter-série entre árvores diferentes; EPS: Expressed Population Signal (Sinal expresso pela população).

Figura 5 - Cronologia da largura de anéis de *L. racemosa* no manguezal do Parque Estadual do Cocó (Ceará/Brasil), durante o período de 1999-2023.



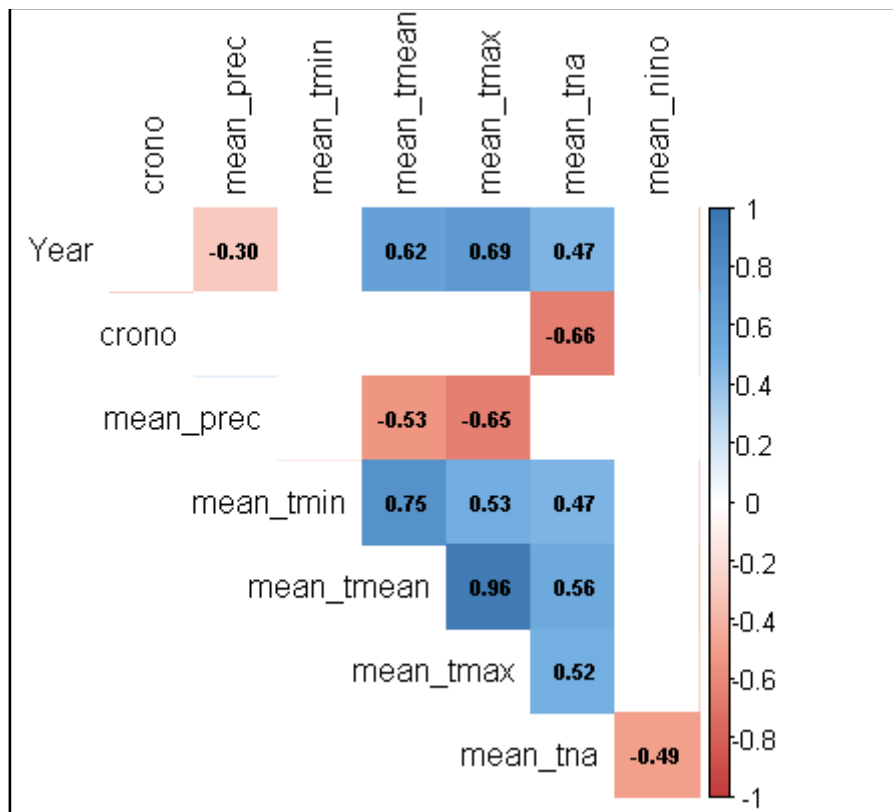
Fonte: Os autores.

Nota: Linhas acinzentadas indicam o crescimento das séries da cronologia (raios). A linha preta indica a média do crescimento desses raios.

3.3 Correlações do clima com o crescimento

Não encontramos relações entre as variáveis climáticas locais anuais e o crescimento da espécie, porém houve uma influência negativa da temperatura superficial do oceano atlântico norte (Figura 6).

Figura 6 - Matriz de correlação de Pearson entre a cronologia de *L. racemosa* (CE/Brasil) e variáveis climáticas (valores médios anuais de 1999-2023).



Fonte: Os autores

Nota: Nos quadrantes estão os coeficientes de correlação com $p \leq 0,05$. Valores em vermelho indicam correlação negativa (azul, positiva). Variáveis climáticas, valores anuais: mean_prec: média de precipitação na área; mean_tmin: média de temperatura mínima; mean_tmean: média de temperatura; mean_tmax: média de temperatura máxima; mean_nino: média dos valores da anomalia El Niño; mean_tna: média de temperatura do atlântico norte.

Os modelos de regressão múltipla finais (simplificados) foram significativamente diferentes dos modelos gerais, sendo mais parcimoniosos em explicar as variações de RWI (Apêndice A), e retendo de maneira geral os efeitos de preditores climáticos dos meses do período seco (Tabela 2). O crescimento das árvores respondeu a quase todas as variáveis climáticas testadas, com exceção da média de temperatura mínima (Tabela 2). O modelo construído com a precipitação média na estação seca foi o segundo que melhor explicou a

variação observada na cronologia ($R^2 = 0.54$), com importância relativa alta para três meses finais do ano ($IR = 0.527$), corroborando nossa segunda hipótese. A temperatura do ar local (média e máxima) também apresentou potencial de explicação do crescimento observado ($R^2 = 0.53$ e 0.36 , respectivamente). A regressão com a temperatura do atlântico norte também demonstrou potencial para explicar a variação de crescimento das árvores na área ($R^2 = 0.48$).

Tabela 2 – Modelos finais de regressões lineares múltiplas entre a cronologia de *L. racemosa* (RWI) no Parque Estadual do Cocó, Ceará, Brasil e dados mensais de variáveis climáticas no período de 1999-2023.

<i>Precipitação</i>			<i>Temperatura média</i>		
Variáveis	E ± SE	IR	Variáveis	E ± SE	IR
(Intercepto)	0.8227 ± 0.2207**	-	(Intercepto)	19.455 ± 8.7488*	-
Junho	-0.0034 ± 0.0016*	0.056	Abril	-1.1027 ± 0.2809***	0.1842
Julho	0.0054 ± 0.0024*	0.048	Mai	0.7805 ± 0.2567**	0.0748
Setembro	0.0196 ± 0.0078*	0.226	Julho	0.7791 ± 0.3191*	0.0543
Outubro	-0.0381 ± 0.0113**	0.117	Dezembro	-1.0553 ± 0.2335***	0.2931
Dezembro	0.0155 ± 0.0041**	0.184			
RWI ~ jun + jul + ago + set + out + dez $R^2 = 0.54$ (F = 6.54; df = 19; p=0.001)			RWI ~ abr + mai + jul + dez $R^2 = 0.53$ (F = 7.71; df = 20; p<0.001)		
<i>Temperatura máxima</i>			<i>Temperatura oceano</i>		
Variáveis	E ± SE	IR	Variáveis	E ± SE	
(Intercepto)	25.2241 ± 7.9973**	-	(Intercepto)	38.8203 ± 7.8079***	
Março	-0.3811 ± 0.1745*	0.081	Novembro	-1.3954 ± 0.2883***	
Outubro	0.5813 ± 0.2591*	0.064			
Dezembro	-0.9659 ± 0.2555**	0.298			
RWI ~ feb + mar + may + aug $R^2 = 0.36$ (F = 5.59; df = 21; p<0.001)			RWI ~ nov $R^2 = 0.48$ (F = 23.42; df = 23; p<0.0001)		

Fonte: Os autores (2025).

Nota: A tabela mostra os valores estimados (E), erro padrão (EP) e significância (p) de cada efeito incluído no modelo final de cada variável climática. *p<0.05, **p<0.01 e ***p<0,0001. Os valores de importância relativa (IR) de cada mês foram calculados com base no R^2 . Meses que não foram significativos não foram incluídos nos modelos finais. A temperatura do oceano é a do Atlântico Norte.

O modelo geral construído com os meses significativos de todas as variáveis climáticas reteve apenas as variáveis de precipitação e temperatura do atlântico norte após a simplificação ($R^2=0.70$) (Tabela 3). Nesse modelo, as precipitações dos meses de outubro e dezembro apresentaram relações inversas com o RWI enquanto a temperatura do Oceano Atlântico Norte teve relação inversa com o RWI (Tabela 3).

Tabela 3 – Modelo final de regressão linear múltipla do entre (RWI) de *L. racemosa* no Parque Estadual do Cocó, Ceará, Brasil e dados mensais de diferentes variáveis climáticas (precipitação e temperatura do Oceano Atlântico Norte) no período de 1999-2023.

<i>Precipitação + Temperatura oceano</i>		
Variáveis	E ± SE	IR
(Intercepto)	37.5868 ± 5.9220***	-
Precipitação outubro	-0.0294 ± 0.0080**	0.0996
TSO novembro	-1.3537 ± 0.2185***	0.4902
Precipitação dezembro	0.0118 ± 0.0029***	0.1521

RWI ~ prec_out + prec_dez + tso_nov
R² = 0.70
(F = 20.12; df = 21; p < 0,00001)

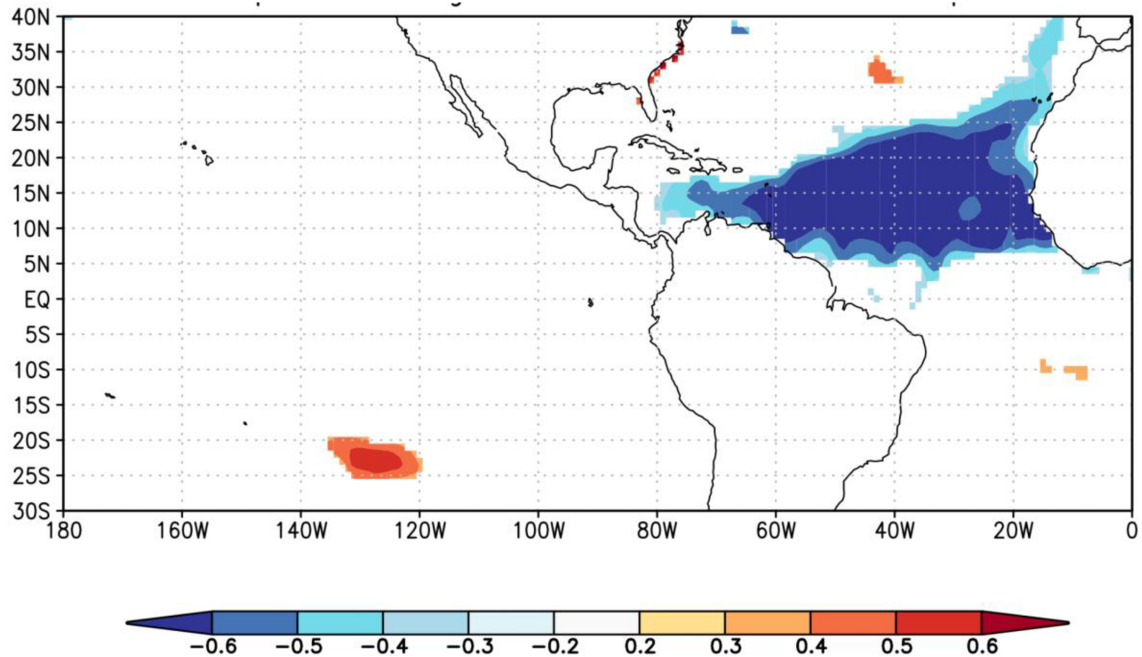
Fonte: Os autores (2025).

Nota: A tabela mostra os valores estimados (E), erro padrão (EP) e significância (p) de cada efeito incluído no modelo final de cada variável climática. *p<0.05, **p<0.01 e ***p<0,0001. Os valores de importância relativa (IR) de cada mês foram calculados com base no R². Meses que não foram significativos não foram incluídos nos modelos finais. A temperatura do oceano é a do Atlântico Norte.

3.4 Correlações macroclimáticas

Seguindo o resultado da matriz de correlação e da seleção de modelos, não conseguimos observar nenhuma influência de anomalias de temperatura do oceano pacífico equatorial (*El Niño/La Niña*) no crescimento das árvores de *L. racemosa*. Entretanto, como observado nos resultados acima, a variação de crescimento ao longo dos anos foi fortemente relacionada à temperatura do atlântico norte, com esta variável macroclimática apresentando uma forte relação negativa com o crescimento da espécie na área de estudo. Esse resultado corrobora nossa hipótese de que eventos macroclimáticos com influência negativa na precipitação local reduzem o crescimento anual da população (Figura 7).

Figura 7- Correlação espacial negativa entre o aumento da temperatura do Oceano Atlântico Norte e o crescimento anual de *Laguncularia racemosa* no Parque Estadual do Cocó, Ceará, Brasil.



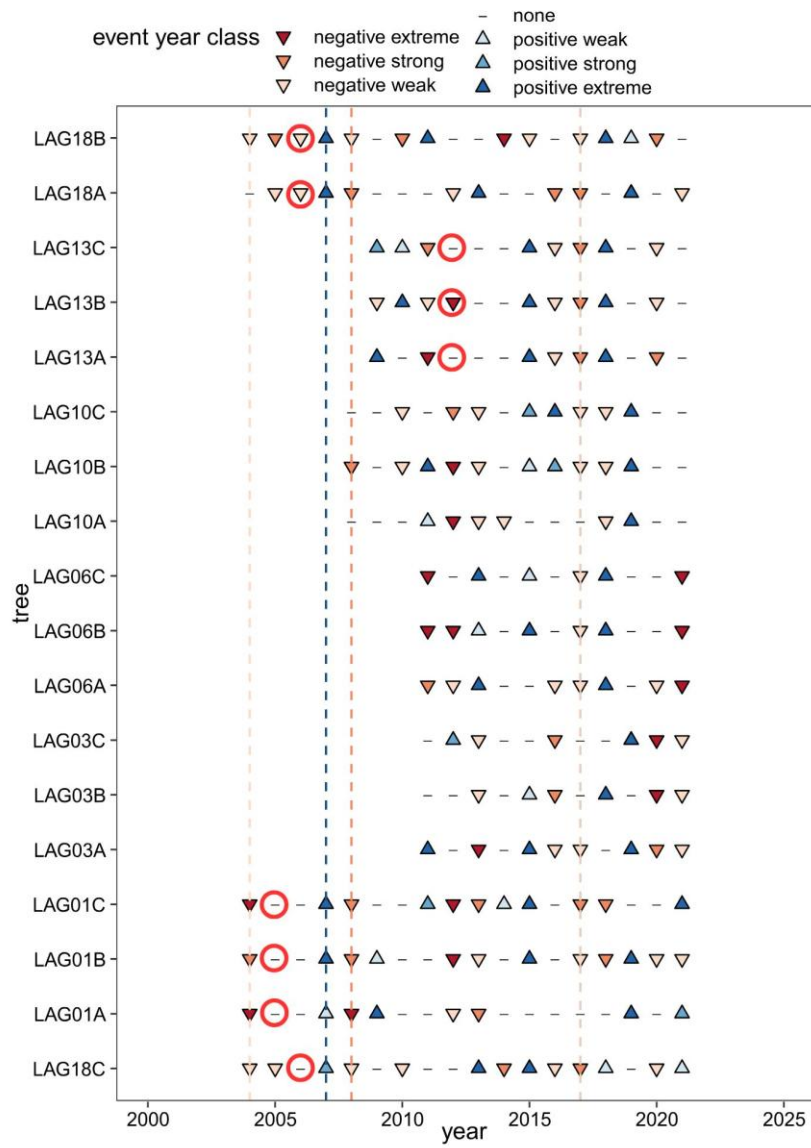
Fonte: Os autores

3.5 Influência de perturbações e desvios de crescimento

Muitas amostras datadas apresentaram registros de eventos de fogo anteriores ao de 2024 (Figura 3). Entretanto, a análise de anos ponteiro não demonstrou padrões claros de influência do fogo no crescimento das árvores atingidas. A análise de desvios de crescimento sugere que as árvores incluídas respondem mais sensivelmente a anos em que as condições climáticas são menos favoráveis (Figura 8). Por exemplo, em 2017, as temperaturas médias e máximas (dezembro) estiveram acima do normal e a precipitação foi abaixo da média histórica para o mesmo mês (1999-2023) reforçando o resultado anterior (Tabela 3) e as hipóteses elaboradas para as variáveis climáticas locais (1,2).

Figura 8 - Padrão de crescimento individual de *L. racemosa* em relação à média da população de árvores acima de 10 anos com amostras marcadas por fogos anteriores no Parque Estadual do Cocó, Ceará,

Brazil.



Fonte: Os autores

Nota: Triângulos vermelhos para baixo indicam crescimento abaixo da média, enquanto azuis para cima indicam crescimento acima da média. Linhas tracejadas indicam anos em que 75% dos raios apresentam queda (40%) ou alta (60%) no crescimento. Círculos vermelhos indicam eventos de fogo.

4. DISCUSSÃO

Este é o primeiro trabalho que construiu cronologia com anéis de crescimento para *L. racemosa*, espécie de manguezal com ampla distribuição na região tropical das Américas. Nós identificamos as camadas de crescimento para a espécie, construímos uma cronologia para qual observamos relações com o clima fora da estação de crescimento (temperaturas médias, máximas, precipitação e TAN). Nossos achados indicam o crescimento síncrono para esta espécie e sua sensibilidade ao clima em escala global, o que possibilita seu uso em estudos de dinâmica de vegetação e sequestro de carbono em biomassa do manguezal (XIONG *et al.*, 2019).

4.1 Limites dos anéis de crescimento

Ambas as espécies estudadas apresentam limites de crescimento visíveis, porém com marcações distintas (WORBES *et al.*, 2010), conforme já observado em outro estudo com anéis de crescimento com as duas espécies (MOYA *et al.*, 2024). Assim como em Moya *et al.* (2024), que verificou que o crescimento de *A. marina* é bastante desordenado, encontramos alta frequência de anastomose e condições insuficientes para realizar sincronização dentro e entre amostras para *A. germinans*. Entretanto, diferentemente do encontrado antes (MOYA *et al.*, 2024), a população de *L. racemosa* no nosso local de estudo apresentou marcações anuais, possibilitando sincronizar o crescimento de 12 árvores com ótimas métricas de sincronia, demonstrando robustez da cronologia construída (BRIENEN; SCHÖNGART; ZUIDEMA, 2016; WORBES *et al.*, 2010, SPEER, 2010). Esse resultado converge com o potencial registrado anteriormente para a formação de anéis de crescimento anuais de *L. racemosa* (ESTRADA *et al.*, 2006).

Entretanto, os limites vistos no presente estudo são distintos dos observados em Estrada *et al.* (2006), se assemelhando muito mais com o padrão observado por Moya *et al.* (2024) para a população de *L. racemosa* em uma zona com regime de pluviosidade, temperatura e sazonalidade climática similares aos do PEC (volume de precipitação de 1000 mm concentrado em até seis meses, temperaturas entre 21-36°C). Esses resultados corroboram a ideia de que espécies de mangue podem apresentar limites de crescimento bem delimitados ou não, a depender das características da espécie (gatilhos de crescimento exógenos/endógenos) e das condições de sazonalidade do ambiente (ROBERT *et al.*, 2011).

Dessa forma, nossos resultados apontam para uma sensibilidade a gatilhos ambientais por parte de *L. racemosa* (ROBERT *et al.*, 2011) mas sugere que *A. germinans* pode ter seu crescimento determinado por fatores endógenos (MOYA *et al.*, 2024).

4.2 Cronologia do crescimento

As métricas da cronologia obtidos para *L. racemosa* indicam que a população do PEC possui bons níveis de sincronia, com variabilidade de crescimento anual semelhante entre as árvores, apontando a espécie como sensível a variáveis ambientais que influenciam o seu crescimento (SPEER, 2010). Esse resultado é semelhante ao de outros estudos com espécies de manguezal crescendo sob sazonalidade climática (MENEZES *et al.*, 2003, CHOWDHURY *et al.*, 2023a; CHOWDHURY *et al.*, 2023b; MAXWELL; HARLEY; RAHMAN, 2018) e comparável ao de espécies tropicais de florestas estacionais (ARAGÃO; *et al.*, 2019; ARAGÃO, *et al.*, 2022). A média de crescimento anual desta população é de aproximadamente duas vezes acima do encontrado em espécies de mangue que ocupam o dossel (RAHMAN *et al.*, 2020; CHOWDHURY *et al.*, 2023a). Esse resultado sugere que as condições para o crescimento dessa população no PEC, no geral, são favoráveis, uma vez que o crescimento da espécie destoa do esperado para manguezais com sazonalidade do regime hídrico (RAHMAN *et al.*, 2020; CHOWDHURY *et al.*, 2023a). Esse resultado pode estar associado à influência reduzida que as marés possuem na área do estudo, uma vez que alterações topográficas e hidrológicas dificultam substancialmente a chegada das marés ao local (GASTÃO; PINHEIRO, 2025). Seguindo o dado de que a área está em regeneração natural há 40 anos, após o fim das atividades da Salina Diogo, esperávamos amostrar indivíduos mais velhos ao coletar discos de árvores maiores (32 cm diâmetro máximo). Entretanto, o rápido crescimento em conjunto com as baixas idades média e máxima encontradas sugerem que essas árvores estão atingindo senescência precoce, como apontado pelos padrões observados em múltiplas espécies de crescimento rápido em Brienen *et al.* (2020).

4.3 Influência de fatores climáticos locais

A população respondeu às variáveis climáticas locais de precipitação e temperatura (média e máxima), o que aponta para a sensibilidade da espécie à disponibilidade

de água doce, assim como em outras espécies tropicais (ARAGÃO *et al.*, 2022) e de manguezal em ambientes com sazonalidade hídrica (CHOWDHURY *et al.*, 2023a; CHOWDHURY *et al.*, 2024). Apesar das médias anuais das variáveis climáticas locais não terem se correlacionado com o crescimento anual da espécie, encontramos correlações com as médias mensais de quase todas as variáveis climáticas utilizadas. Esse resultado se assemelha ao obtido em estudos com vegetações sob sazonalidade dos condicionantes de crescimento (ARAGÃO *et al.*, 2022; ZUIDEMA *et al.*, 2022). A precipitação, principalmente do fim da estação seca, influencia positivamente enquanto a temperatura do ar influencia negativamente o crescimento, corroborando as hipóteses 1 e 2. Essa relação era esperada, uma vez que a precipitação atua como agente regulador do estresse salino em manguezais (CHOWDHURY *et al.*, 2016) e a temperatura do ar aumenta sua demanda hídrica, intensificando a evapotranspiração potencial no solo e nas plantas, reduzindo o efeito positivo da precipitação (ALMOROX; QUEJ; MARTÍ, 2015; HUNTINGTON, 2010). Entretanto, chama a atenção os altos valores de importância relativa dos meses finais do ano para todas as variáveis climáticas, indicando que o período da estação seca é majoritariamente responsável pela modulação do crescimento dessa população.

Esse resultado é convergente com as análises da relação clima-crescimento de espécies tropicais e subtropicais ($n = 347$), que apontam para a importância da estação seca para a explicação da variabilidade interanual do crescimento de espécies tropicais, ressaltando a relevância do recurso hídrico em regiões com sazonalidade pluvial (ZUIDEMA *et al.*, 2022). Dessa forma, variáveis climáticas atuando durante o período em que a salinidade do solo aumenta parece gerar respostas mais sensíveis da espécie, o que demonstra o sinergismo entre clima e salinidade já observado em manguezais (CHOWDHURY *et al.*, 2023b).

4.4 Teleconexões do Atlântico Norte

O único e maior efeito observado de fatores macroclimáticos sobre o crescimento de *L. racemosa* foi o da temperatura da superfície do Oceano Atlântico Norte (TAN). Os efeitos negativos da TAN sobre o crescimento interanual da população são significativamente altos, com os maiores coeficientes e IRs de todos os modelos de regressão múltipla ajustados (Tabela 3). Esse resultado reflete a influência que o atlântico tropical tem sobre a precipitação na região norte do nordeste brasileiro, onde o estudo foi realizado (SILVA *et al.*, 2020). Eventos de alta na TAN dificultam o deslocamento para o hemisfério

sul esperado para a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o principal gerador de chuvas da região (MARENGO *et al.*, 2017; SERVAIN *et al.*, 1999; VITORIO *et al.*, 2025).

A influência do Atlântico sobre o crescimento de espécies tropicais a partir da modulação de fatores climáticos locais é bem documentada em estudos investigando relações clima-crescimento de espécies arbóreas no nordeste brasileiro (ARAGÃO; ZUIDEMA; GROENENDIJK, 2022; ARAGÃO *et al.*, 2019; DE CARVALHO NOGUEIRA JR *et al.*, 2017). De forma análoga, elementos macroclimáticos que influenciam a precipitação local são responsáveis por parte da variação de crescimento interanual em espécies de manguezal, ao passo que aumentam ou diminuem os efeitos negativos da salinidade sobre as árvores (CHOWDHURY *et al.*, 2023b; MAXWELL; HARLEY; RAHMAN, 2018). A variação do crescimento observado em *L. racemosa* está, portanto, provavelmente associada às oscilações dos níveis de salinidade no solo modulados pela precipitação local, que por sua vez é modulada pela TAN, uma vez que o estresse salino gera demandas energéticas em árvores de manguezal, condicionando seu crescimento (PARIDA; MITTRA, 2003; PERRI *et al.*, 2018; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ *et al.*, 2018). De todo modo, o cenário é preocupante, uma vez que o oceano atlântico é associado à maioria das anomalias de precipitação no norte do nordeste brasileiro (VITORIO *et al.*, 2025), e é previsto aumento de sua temperatura com as mudanças climáticas (COOLEY *et al.*, 2022), intensificando a perda de ecossistemas de manguezal (ALONGI, 2008). Nosso estudo corrobora essa expectativa, tendo em vista que altas temperaturas no atlântico tiveram uma forte influência negativa sobre o crescimento de uma espécie típica de manguezal.

4.5 Desvios de crescimento

A análise de desvios de crescimento aponta para uma resposta mais sensível por parte da população a eventos de convergência dos fatores climáticos que afetam negativamente seu crescimento. Eventos de alta nas temperaturas locais combinados com baixa precipitação durante os meses de estação seca (2017) podem atuar de maneira a intensificar a evapotranspiração do solo (ALMOROX; QUEJ; MARTÍ, 2015; HUNTINGTON, 2010) e, com isso, aumentar o estresse salino sobre as árvores, impactando seu crescimento pela sinergia de fatores climáticos e edáficos (CHOWDHURY *et al.*, 2023b; PERRI *et al.*, 2022). A análise de desvios de crescimento realizada não apontou um

padrão claro de respostas ao fogo, e sugere haver maior sensibilidade da população a alguns eventos climáticos, como o de 2017. Entretanto, esse resultado foi obtido com poucas árvores, jovens, devido ao recorte de idade x marcações de fogo, o que não nos permitiu explorar os dados com mais clareza.

Além disso, na área há presença de vegetação herbácea de água doce que possui seu ciclo de vida ligado ao período chuvoso, gerando biomassa seca que possui alto grau de inflamabilidade durante a estiagem (ABRAHÃO; ZANDEVALLI, 2025). Esse cenário associado às altas de temperatura e constante pressão antrópica são propícios para o surgimento de incêndios no manguezal do PEC (DOOKIE *et al.*, 2025). Dado que o nosso estudo não conseguiu deixar claro como espécies de manguezal têm seu crescimento afetado por distúrbios de fogo, salientamos a necessidade da elaboração de mais estudos abordando os efeitos de eventos de fogo em ecossistemas não tradicionalmente associados a essas perturbações, uma vez que os manguezais já são alvo de constantes pressões antrópicas e sua área de ocupação está projetada para recrudescer frente as mudanças climáticas (AKRAM *et al.*, 2023; LEAL; SPALDING, 2024). Ademais, salienta-se a importância de projetos de restauração ecológica como fonte de informação e de preservação desses ecossistemas (DARMAWAN *et al.*, 2025).

5 CONCLUSÃO

Com esse trabalho conseguimos reforçar a ideia de que pelo menos uma parte das espécies de manguezal formam anéis de crescimento anual. Existe influência de fatores climáticos locais no crescimento de *L. racemosa*, principalmente precipitação e temperatura durante a estação seca, mas também de elementos macroclimáticos que modulam os mecanismos do clima local. Fatores como a temperatura da superfície do oceano, que influenciam em cascata a precipitação local, têm forte efeito sobre o crescimento da população. Damos ênfase à importância de projetos de restauração ecológica e a expansão de estudos abordando o efeito de distúrbios para os quais o ecossistema não está tradicionalmente associado, mas que com as mudanças climáticas podem se tornar cada vez mais comuns. Salientamos ainda que a intensidade com que essas mudanças afetam os regimes climáticos locais tem efeito direto sobre o crescimento de árvores de mangue e, com isso, sobre a manutenção de manguezais. Dadas as projeções de tendência geral de aumento das temperaturas e de anomalias sobre as dos oceanos, nosso estudo alerta para a conservação de ecossistemas estuarinos frente às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, Anna. **RestauraCocó - Restauração ecológica e gestão participativa da área incendiada do Parque Estadual do Cocó**. Fortaleza: Sema, 2025. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2025/10/Anexo-VIII.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2025.

ABRAHÃO, Anna; ZANDEVALLI, Roberta Boscaini. **RestauraCocó - Restauração ecológica e gestão participativa da área incendiada do Parque Estadual do Cocó: experimento de restauração e regeneração natural e reabilitação de brejo e manguezal**. Fortaleza: Sema, 2025. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2025/10/Anexo-IV.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2025.

AHMED, Shamim *et al.* Salinity reduces site quality and mangrove forest functions. From monitoring to understanding. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158662, dez. 2022.

AHMED, Shamim *et al.* Mangrove tree growth is size-dependent across a large-scale salinity gradient. **Forest Ecology and Management**, v. 537, p. 120954, jun. 2023.

AKRAM, Hina *et al.* Mangrove Health: A Review of Functions, Threats, and Challenges Associated with Mangrove Management Practices. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1698, 23 ago. 2023.

AL-KHAYAT, Jassim A.; ALATALO, Juha M. Relationship Between Tree Size, Sediment Mud Content, Oxygen Levels, and Pneumatophore Abundance in the Mangrove Tree Species *Avicennia Marina* (Forssk.) Vierh. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 1, p. 100, 19 jan. 2021.

ALMEIDA, R.; COELHO JUNIOR, C. Manguezal e serviços ecossistêmicos. **Atlas dos Manguezais do Brasil. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**, p. 85-95, 2018.

ALMOROX, Javier; QUEJ, Victor H.; MARTÍ, Pau. Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. **Journal of Hydrology**, v. 528, p. 514–522, set. 2015.

ALONGI, Daniel M. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 76, n. 1, p. 1–13, jan. 2008.

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, fev. 2022.

BARTOŃ, Kamil. **MuMIn: Multi-Model Inference**. , 28 maio 2010. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>. Acesso em: 10 jan. 2026

BRIENEN, Roel J. W.; SCHÖNGART, Jochen; ZUIDEMA, Pieter A. Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees. *In*:

GOLDSTEIN, Guillermo; SANTIAGO, Louis S. (Orgs.). **Tropical Tree Physiology**. Cham: Springer International Publishing, 2016. v. 6 p. 439–461.

BUNN, Andy *et al.* **dplR: Dendrochronology Program Library in R**, 2 set. 2007. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=dplR>>. Acesso em: 10 jan. 2026

BURNHAM, Kenneth P.; ANDERSON, David Ray; ANDERSON, David Raymond. **Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach**. 2. ed., [4. printing] ed. New York, NY: Springer, 2010.

CHOWDHURY, Md. Qumruzzaman *et al.* Nature and Periodicity of Growth Rings in two Bangladeshi Mangrove Species. **IAWA Journal**, v. 29, n. 3, p. 265–276, 2008.

CHOWDHURY, Md. Qumruzzaman *et al.* Synergistic effects of climate and salinity on radial growth of *Excoecaria agallocha* L. in the Sundarbans world heritage mangrove ecosystem. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 280, p. 108181, jan. 2023^a

CHOWDHURY, Md. Qumruzzaman *et al.* Radial growth in mangrove *Xylocarpus granatum* J. Koenig is driven by salinity in the Sundarbans, Bangladesh. **Dendrochronologia**, v. 79, p. 126082, jun. 2023b.

CHOWDHURY, Md Qumruzzaman *et al.* Salinity regulates radial growth of *Cynometra ramiflora* L. in the Sundarbans mangrove ecosystem. **Dendrochronologia**, v. 88, p. 126270, 2024.

CHOWDHURY, Md. Qumruzzaman; DE RIDDER, Maaïke; BEECKMAN, Hans. Climatic Signals in Tree Rings of *Heritiera fomes* Buch.-Ham. in the Sundarbans, Bangladesh. **PLOS ONE**, v. 11, n. 2, p. e0149788, 29 fev. 2016.

COOLEY, S. *et al.* Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services. In: PÖRTNER, H.-O. *et al.* (Ed.). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. p. 379-550. doi:10.1017/9781009325844.005.

Coorecorder basics. Cybis Elektronik & Data AB, , [S.d.]. Disponível em: <<https://cdendro.se/dendro/>>

DARMAWAN, Soni *et al.* Identification before-after Forest Fire and Prediction of Mangrove Forest Based on Markov-Cellular Automata in Part of Sembilang National Park, Banyuasin, South Sumatra, Indonesia. **Remote Sensing**, v. 12, n. 22, p. 3700, 11 nov. 2020.

DE CARVALHO NOGUEIRA, Francisco *et al.* Responses of tree-ring growth in *Schinopsis brasiliensis* to climate factors in the dry forests of northeastern Brazil. **Trees**, v. 32, n. 2, p. 453–464, abr. 2018.

- DOOKIE, Sabrina; ANSARI, Abdullah Adil; JAIKISHUN, Sirpaul. Forest-fire interactions, impacts, and implications: a focus on mangroves. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 55, 7 mar. 2025.
- ESTRADA, Gustavo Calderucio Duque *et al.* Annual growth rings in the mangrove *Laguncularia racemosa* (Combretaceae). **Trees**, v. 22, n. 5, p. 663–670, out. 2008.
- FUNCEME. **Postos pluviométricos**. Fortaleza: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2025. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=172. Acesso em 10 set. 2025.
- GASTÃO, Francisco Gleidson; PINHEIRO, Lidriana de Souza. **RestauraCocó - Restauração ecológica e gestão participativa da área incendiada do Parque Estadual do Cocó: relatório técnico: topografia e batimetria** : anexo i do projeto restauracocó. Fortaleza: Sema, 2025. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2025/10/Anexo-I.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2025.
- HARRIS, Ian *et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific data**, v. 7, n. 1, p. 109, 2020.
- HAYES, Matthew A. *et al.* Groundwater enhances above-ground growth in mangroves. **Journal of Ecology**, v. 107, n. 3, p. 1120–1128, maio 2019.
- HOLMES, R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. **Tree Ring Bulletin**, v. 43, p. 69–78, 1983.
- HUGHES, Malcolm K.; SWETNAM, Thomas W.; DIAZ, Henry F. (ORGS.). **Dendroclimatology: Progress and Prospects**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. v. 11
- HUNTINGTON, Thomas G. Climate Warming-Induced Intensification of the Hydrologic Cycle. *In: Advances in Agronomy*. [S.l.]: Elsevier, 2010. v. 109 p. 1–53.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Gráficos Climatológicos**. Brasília, DF: INMET. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos>. Acesso em: 02 de mar, 2026.
- KOH, HI *et al.* MANGROVE FORESTS: PROTECTION AGAINST AND RESILIENCE TO COASTAL DISTURBANCES. **JOURNAL OF TROPICAL FOREST SCIENCE**, v. 30, n. 5, p. 446–460, 14 nov. 2018.
- LEAL, Marice; SPALDING, Mark D. **The state of the world's mangroves 2024**. [S.l.]: Global Mangrove Alliance, 2024. Disponível em: <https://www.mangrovealliance.org/wp-content/uploads/2024/01/The-State-of-the-Worlds-Mangroves-2024.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- LEÃO, A. R.; PRATES, A. P. L.; FUMI, M. Manguezal e unidades de conservação. *In: INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – ICMBio (Org.). Atlas dos Manguezais do Brasil*. Brasília: ICMBio, 2018. p. 55-72.

LEONG, Rick C. *et al.* High-resolution pattern of mangrove species distribution is controlled by surface elevation. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 202, p. 185–192, mar. 2018.

MARENGO, José A. *et al.* Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2 suppl 1, p. 1973–1985, ago. 2018.

MAXWELL, Justin T.; HARLEY, Grant L.; RAHMAN, Abdullah F. Annual Growth Rings in Two Mangrove Species from the Sundarbans, Bangladesh Demonstrate Linkages to Sea-Level Rise and Broad-Scale Ocean-Atmosphere Variability. **Wetlands**, v. 38, n. 6, p. 1159–1170, dez. 2018.

MENEZES, M.; BERGER, U.; WORBES, M. Annual growth rings and long-term growth patterns of mangrove trees from the Bragança peninsula, North Brazil. **Wetlands Ecology and Management**, v. 11, n. 4, p. 233-242, 2003.

MORO, Marcelo Freire. **Relatório final: projeto RESTAURACOCÓ (FUNCAP/UFC/SEMA) – Programa Cientista Chefe de Meio Ambiente: fitossociologia do manguezal no trecho atingido por um incêndio no Parque Estadual do Cocó.** Fortaleza: SEMA, 2025.

MOYA, Róger *et al.* Variation in Annual Ring and Wood Anatomy of Six Tree Mangrove Species in the Nicoya Gulf of Costa Rica. **Water**, v. 16, n. 22, p. 3207, 8 nov. 2024.

OKELLO, Judith Auma *et al.* Mangrove trees survive partial sediment burial by developing new roots and adapting their root, branch and stem anatomy. **Trees**, v. 34, n. 1, p. 37–49, fev. 2020.

PARIDA, Asish Kumar; DAS, A. B.; MITTRA, B. Effects of salt on growth, ion accumulation, photosynthesis and leaf anatomy of the mangrove, *Bruguiera parviflora*. **Trees - Structure and Function**, v. 18, n. 2, p. 167–174, 1 mar. 2004.

PASQUINI, B. B. (org.) (2020). **Plano de Manejo do Parque Estadual do Cocó.** Fortaleza, Secretaria Estadual do Meio Ambiente.

PERRI, Saverio; ENTEKHABI, Dara; MOLINI, Annalisa. Plant Osmoregulation as an Emergent Water-Saving Adaptation. **Water Resources Research**, v. 54, n. 4, p. 2781–2798, abr. 2018.

PERRI, Saverio *et al.* Salinity-induced limits to mangrove canopy height. **Global Ecology and Biogeography**, v. 32, n. 9, p. 1561–1574, set. 2023.

RAHMAN, Md. Saidur *et al.* Salinity drives growth dynamics of the mangrove tree *Sonneratia apetala* Buch. -Ham. in the Sundarbans, Bangladesh. **Dendrochronologia**, v. 62, p. 125711, ago. 2020.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Viena, Áustria: R Foundation for Statistical Computing, 2015. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 15 set. 2025.

ROBERT, E. M. R. *et al.* Salinity fluctuations in the mangrove forest of Gazi Bay, Kenya: lessons to take for future research. **Nature & Faune**, 15 mar. 2009a.

ROBERT, Elisabeth M. R. *et al.* A safe hydraulic architecture as wood anatomical explanation for the difference in distribution of the mangroves *Avicennia* and *Rhizophora*. **Functional Ecology**, v. 23, n. 4, p. 649–657, ago. 2009b.

ROBERT, Elisabeth M. R. *et al.* Mangrove growth rings: fact or fiction? **Trees**, v. 25, n. 1, p. 49–58, fev. 2011.

RODRÍGUEZ- RODRÍGUEZ, Jenny Alexandra *et al.* Functional traits of leaves and forest structure of neotropical mangroves under different salinity and nitrogen regimes. **Flora**, v. 239, p. 52–61, fev. 2018.

SAINTILAN, Neil. Above- and below-ground biomasses of two species of mangrove on the Hawkesbury River estuary, New South Wales. **Marine and Freshwater Research**, v. 48, n. 2, p. 147–152, 18 abr. 1997.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (SEMA). **Mapa de localização de cicatriz de fogo e Unidades de Conservação no município de Fortaleza – CE**. Fortaleza: SEMA/ICMBio, 2025.

SCHÖNGART, Jochen *et al.* Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges. In: AMOROSO, Mariano M. *et al.* (Orgs.). **Dendroecology**. Cham: Springer International Publishing, 2017. v. 231 p. 35–73.

SCHULMAN, Edmun. **Dendroclimatic changes in semiarid America**. Tucson: Arizona Press, [S.d.].

SCHWEINGRUBER, FritzHans *et al.* Rhythmic growth fluctuations in forest trees of Central Europe and the Front Range in Colorado. **Trees**, v. 4, n. 2, jul. 1990.

SERVAIN, Jacques *et al.* Relationship between the equatorial and meridional modes of climatic variability in the tropical Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 4, p. 485–488, 15 fev. 1999.

SOUZA, Brunna T. *et al.* Occurrence of annual growth rings in *Rhizophora mangle* in a region with low climate seasonality. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, n. suppl 1, p. 517–525, 29 abr. 2016.

SPEER, J. H. **Fundamentals of Tree-Ring Research**. Tucson: University of Arizona Press, 2010.

TAN, Wee-Kee *et al.* Dynamic secretion changes in the salt glands of the mangrove tree species *A vicennia officinalis* in response to a changing saline environment. **Plant, Cell & Environment**, v. 36, n. 8, p. 1410–1422, ago. 2013.

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, jan. 2013.

VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, Marieke; VAN DER MAATEN, Ernst; BOURIAUD, Olivier. pointRes: An R package to analyze pointer years and components of resilience. **Dendrochronologia**, v. 35, p. 34–38, out. 2015.

VITORIO, Evelin Landin *et al.* Interannual rainfall variability in Northeast Brazil influenced by Pacific and Atlantic climate modes. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 112, p. 101596, dez. 2025.

WORBES, Martin. Wood Anatomy and Tree-Ring Structure and Their Importance for Tropical Dendrochronology. *In*: JUNK, Wolfgang J. *et al.* (Orgs.). **Amazonian Floodplain Forests**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. v. 210 p. 329–346.

XIONG, Yanmei *et al.* Global patterns of tree stem growth and stand aboveground wood production in mangrove forests. **Forest Ecology and Management**, v. 444, p. 382–392, jul. 2019.

ZANG, Christian; BIONDI, Franco. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. **Ecography**, v. 38, n. 4, p. 431–436, abr. 2015.

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

APÊNDICE A – ROTINA DE SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS CLIMÁTICOS

ROTINA DE SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS CLIMÁTICOS

Primeira etapa – Construção de um modelo cheio, composto da variável resposta (RWI) e dos doze meses, correspondentes aos valores mensais de cada variável climática.

Fórmula replicada para todas as variáveis climáticas: $RWI \sim \text{variável1_janeiro} + \text{variável1_fevereiro} + \text{variável1_março} + \text{variável1_abril} + \text{variável1_maio} + \text{variável1_junho} + \text{variável1_julho} + \text{variável1_agosto} + \text{variável1_setembro} + \text{variável1_outubro} + \text{variável1_novembro} + \text{variável1_dezembro}$

Neste modelo inicial, a função *dredge* é utilizada para a realização de todas as combinações de meses possíveis, posteriormente ranqueando os modelos gerados em função do AICc.

A partir dos modelos equivalentes gerados pela função, escolhemos com base no AIC, nos graus de liberdade e na significância do modelo quais meses utilizar no modelo final. Este foi comparado via ANOVA com o modelo cheio e com o modelo nulo.

Tabela 1- Comparação entre os modelos de regressão múltipla (modelo nulo, modelo final e modelo geral) que explicam a variação na cronologia (RWI). Estão presentes os resultados para as comparações dos modelos de variáveis climáticas (precipitação, temperatura média e temperatura máxima locais e temperatura do atlântico norte).

Modelo	GL	AIC	p
Precipitação			
M0	-	51.73	-
M1	5	36.70	0.009499 **
M2	7	45.26	0.873939
Temperatura média			
M0	-	51.73	-
M1	4	36.41	0.006979**
M2	8	46.02	0.876607
Temperatura máxima			
M0	-	51.73	-
M1	3	43.04	0.01874*
M2	9	50.30	0.68731
Temperatura do Oceano Atlântico Norte			
M0	-	51.73	-
M1	1	36.17	0.001388 **
M2	11	49.80	0.911338
M0: RWI ~ 1			
M1: RWI ~ variável_final			

Modelo	GL	AIC	p
M2: RWI ~ variável_cheio			

Fonte: Os autores

Nota: M0, M1 e M2 se referem aos modelos nulo, final e cheio, respectivamente. Os graus de liberdade (GL), o valor do *Akaike Information Criterion* e a significância (p) podem ser consultados na tabela.

Este mesmo procedimento foi repetido utilizando as variáveis mensais de todos os modelos finais, conforme o modelo abaixo:

$$\text{RWI} \sim \text{tmax_mar} + \text{tmax_oct} + \text{tmax_dec} + \text{prec_jun} + \text{prec_jul} + \text{prec_sep} + \text{prec_oct} + \text{prec_dec} + \text{tmean_apr} + \text{tmean_may} + \text{tmean_dec} + \text{tmean_jul} + \text{tnab_nov}$$

Após a rotina de exaustão, o modelo final mais parcimonioso com múltiplas variáveis climáticas foi gerado:

$$\text{RWI} \sim \text{tnab_nov} + \text{prec_oct} + \text{prec_dec}$$

Tabela 2- Comparação entre os modelos de regressão múltipla (modelo nulo, modelo final e modelo geral) que explicam a variação na cronologia (RWI). Estão presentes os resultados para as comparações do modelo com múltiplas variáveis climáticas (precipitação e temperatura do atlântico norte).

Modelo	GL	AIC	p
Precipitação e Temperatura do Atlântico Norte			
M0	-	51.73	-
M1	3	23.87	0.000026 **
M2	10	21.28	0.221400

M0: RWI ~ 1

M1: RWI ~ final

M2: RWI ~ cheio

Fonte: Os autores

Nota: M0, M1 e M2 se referem aos modelos nulo, final e cheio, respectivamente. Os graus de liberdade (GL), o valor do *Akaike Information Criterion* e a significância (p) podem ser consultados na tabela.