



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Efeitos de variáveis hidroclimáticas sobre a produção de cacau (*Theobroma cacao L.*) em Mocajuba, Amazônia Oriental

Daniel Fernandes Rodrigues Barroso¹, José Francisco Berrêdo², Marcia Aparecida da Silva Pimentel³, Maurício do Nascimento Moura⁴, Rony Peterson Santos Almeida⁵, Marcelo Cordeiro Thalês⁶, Maria do Perpétuo Socorro Progene Vilhena⁷

¹Doutorando em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal do Pará; Instituto Federal do Maranhão, e-mail: daniel.rodrigues@ifma.edu.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9452-8356> ²Museu Paraense Emílio Goeldi, e-mail: berredo@museu-goeldi.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8590-2462> ³Universidade Federal do Pará, e-mail: mapimentel@ufpa.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9893-9777> ⁴Universidade Federal do Pará, e-mail: mauriciomoura@ufpa.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2652-0587> ⁵Universidade Federal de Sergipe, e-mail: rony_peterson@hotmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0681-0357> ⁶Museu Paraense Emílio Goeldi, e-mail: mcthalles@museu-goeldi.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3944-6846> ⁷Universidade Federal Rural da Amazônia, e-mail: sprogene@ufra.edu.br ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5493-695X>

Artigo recebido em 24/10/2024 e aceito em 22/02/2025

RESUMO

O cacauzeiro (*Theobroma cacao L.*) é uma planta originária do continente americano, a qual exige clima quente e úmido com temperaturas médias anuais não inferior a 21°C e precipitação satisfatória entre 1.500 mm a 2.500 mm anuais. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos de variáveis hidroclimáticas (precipitação, umidade do ar, temperatura e cota máxima do rio Tocantins) sobre a produção de cacau do município de Mocajuba. Utilizou-se um banco de dados com séries temporais de 32 anos (1990 a 2021) das variáveis analisadas disponíveis em diferentes fontes, que foram submetidas a estatística descritiva, análise de permutação multivariada, análise de componentes principais e modelo linear generalizado. Os resultados obtidos permitiram identificar tendência de aumento precipitação e temperatura no período amostral e redução da umidade do ar; análise de permutação multivariada identificou influência das variáveis sobre a produção de cacau, enquanto, que o modelo linear generalizado indicou que a temperatura é a única variável ambiental que influencia positivamente a produção de cacau e que um aumento de 1°C na temperatura, resulta num aumento 120 toneladas de grãos de cacau. Os resultados do estudo confirmam a influência das variáveis hidroclimáticas sobre a produção de cacau de Mocajuba com efeito positivo da temperatura. Nas condições atuais, o município de Mocajuba preserva as características edafoclimáticas para a cultura do cacau, porém, há uma tendência de aumento de temperatura com redução da umidade do ar que poderá prejudicar as lavouras de cacau de Mocajuba, caso essas variáveis seguirem essa tendência.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, Cacau, Rio Tocantins, Amazônia.

Effects of hydroclimatic variables on cocoa (*Theobroma cacao L.*) production in Mocajuba, Eastern Amazon

ABSTRACT

The cacao tree (*Theobroma cacao L.*) is a plant native to the American continent, which requires a warm, humid climate with average annual temperatures of no less than 21°C and satisfactory rainfall of between 1,500 mm and 2,500 mm per year. The objective of the present work was to evaluate the effects of hydroclimatic variables (precipitation, air humidity, temperature and maximum elevation of the Tocantins River) on cocoa production in the municipality of Mocajuba. A database was used with 32-year time series (1990 to 2021) of the variables analyzed available from different sources, which were subjected to descriptive statistics, multivariate permutation analysis, principal component analysis and a generalized linear model. The results obtained allowed us to identify a trend of increasing rainfall and temperature in the sample period and a reduction in air humidity. Multivariate permutation analysis identified the influence of the variables on cocoa production, while the generalized linear model indicated that temperature is the only environmental variable that positively influences cocoa production and that an increase of 1°C in temperature results in an increase of 120 tons of cocoa beans. The results of the study confirm the influence of hydroclimatic variables on cocoa production in Mocajuba, with a positive effect from temperature. Under current conditions, the municipality of Mocajuba preserves the edaphoclimatic characteristics for growing cocoa, but there is a tendency for temperatures to rise and humidity to fall, which could harm Mocajuba's cocoa crops if these variables follow this trend.

Key words: Climate change, Cocoa, Tocantins River, Amazon.

Introdução

O cacauieiro (*Theobroma cacao* L.) é uma planta originária da Bacia Amazônica (Lahive et al., 2019; Motamayor et al., 2002) e seu fruto era muito apreciado por povos primitivos habitantes deste continente. O cacau foi levado para diversas partes do mundo e atualmente, pode ser encontrado em diversas regiões tropicais dos continentes asiático e africano, sendo a Costa do Marfim, o maior produtor mundial desse fruto.

Na Amazônia, o cacau pode ser encontrado em diversos países (Brasil, Colômbia, Peru, Equador), sendo que o Equador é o maior produtor do continente sul-americano. No Brasil, as lavouras de cacau podem ser encontradas nas diferentes regiões do país como no Norte, no Nordeste, no Sudeste e até no Centro-oeste.

Dentre os estados situados na região amazônica brasileira, o cacau é cultivado no Amazonas, Acre, Pará e Rondônia, com grande destaque para o estado do Pará, que se mantém, na atualidade, como o maior produtor nacional do fruto, desempenhando um importante papel dentre os produtos da bioeconomia do estado, ocupando a segunda colocação (Costa et al., 2021).

No Pará, assim como na região amazônica, o cacau é cultivado em terrenos de terra firme e em ecossistemas de várzeas ao longo dos rios amazônicos (Almeida & Brito, 2003). É neste contexto de cultivo de cacau que o município de Mocajuba está inserido, tendo sua produção concentrada em áreas de várzeas do Rio Tocantins e em suas ilhas fluviais.

Os cacauieiros exigem clima quente e úmido com temperaturas médias anuais não inferior a 21°C e precipitação pluviométrica satisfatória entre 1.500 mm a 2.500 mm anuais (Moraes & Bastos, 1972). Segundo estes autores, em regiões com chuvas bem distribuídas e onde a temperatura média anual ultrapassa 23°C, o cacauieiro produzirá durante todo o ano. Complementando as informações de Moraes e Bastos (1972), M'bo et al (2023), descreve que as condições ideais para o cultivo de cacau seriam em regiões com de temperaturas médias máximas entre 32 e 33 °C e médias mínimas de 18 e 21°C com efeito sobre a taxa de fotossíntese máxima nessas faixas de temperatura, enquanto que a quantidade de chuvas entre 1500 e 2500 mm é o recomendado, uma vez, que o excesso de chuvas pode aumentar a incidência de doenças e pragas com aumento da mortalidade dos cacauieiros.

Há um consenso dentro da comunidade científica internacional de que as mudanças climáticas causadas por atividades antrópicas (Slave; Man, 2012; Trenberth, 2018) estão afetando diversos setores da economia, dentre eles, o setor agrícola com grande impacto sobre a produção de alimentos (Berhane, 2018; Bezner et al., 2022; Dakurah et al., 2024; Mahato, 2014;). Neste sentido, estudos em várias partes do mundo (inclusive na Amazônia), apontam para o impacto das mudanças climáticas sobre a produção de cacau (Bunn et al., 2019; Cédric et al., 2025; Cilas & Bastide, 2020; Chiu et al., 2023; Chizari et al., 2017; Igawa et al., 2021; Kenneth & Baba, 2011; Kimengsi & Tosam, 2013; Lahive et al., 2019; M'bo et al., 2023; Olwig et al., 2023; Osei et al., 2017; Sasmita et al., 2023), comprometendo o rendimento da cultura, afetando o padrão de vida e a subsistência dos produtores (Afele et al., 2024; Mensah et al., 2023;).

Estudos apontam a influência de variáveis climáticas na produtividade de cacau, indicando que essas variáveis podem influenciar de forma positiva ou negativa. Yoroba et al., (2023) avaliaram os impactos da variabilidade climática sobre a produção de cacau em Costa de Marfim e constaram que a produção de cacau é afetada pela variabilidade climática da precipitação e da temperatura, pois em alguns lugares do país, a precipitação é preditora de aumento da produção, enquanto, que, em outros lugares, a temperatura parece ser mais promissora em elevar a produção de cacau.

O trabalho de Ojo e Sadiq (2010) estudou a influência da precipitação e da temperatura sobre a produção de cacau na Nigéria e Bomdzele e Molua (2023) analisou a correlação entre variáveis climáticas e a produção de cacau em Camarões e ambos os trabalhos observaram correlação direta entre a produção de cacau e temperatura e inversa com a precipitação. Outra pesquisa desenvolvida na Nigéria por Lawal e Omonona (2014) avaliou através de regressão, os efeitos da chuva, da temperatura e da umidade do ar sobre a produtividade de cacau e obtiveram os seguintes resultados: influência positiva da temperatura e umidade em relação a produtividade negativa com chuva. Outro estudo recente realizado na Indonésia testou um modelo de regressão quadrática para analisar a influência da temperatura (máxima, mínima e média) e da precipitação sobre a produtividade de cacau e constatou que os valores temperatura máxima, mínima e média influenciaram negativamente a produtividade de cacau na ordem de 29.367 kg.ha⁻¹, enquanto que a

precipitação não apresentou efeito significativo sobre a produtividade de cacau (Dhamira & Anggrasari, 2024). Já o trabalho de Danial et al. (2024) avaliou os efeitos da chuva em diferentes clones de cacau e constatou que os níveis de chuva afetam negativamente tanto a produção como a produtividade de cacau. O trabalho de Lawal e Omonona (2014) na Nigéria demonstra efeito negativo do excesso de chuva sobre o rendimento do cacau.

Diversos estudos avaliaram as consequências das mudanças climáticas sobre a fisiologia e sobre o aparecimento de doenças e pragas nas plantas de cacau. Um estudo experimental sobre a produtividade das plantas de cacau na África Ocidental revelou que mesmo em cenários de mudanças climáticas com elevação de temperatura, a produtividade primária se mantém devido as altas concentrações de CO₂ na atmosfera, ou seja, os efeitos fisiológicos das altas temperaturas é compensada pelo excesso de dióxido de carbono (Black et al., 2021). Em estudo atual, Asante et al (2025) testaram modelos que avaliaram a produção de cacau em cenários de aumento de temperatura e concluíram que a produção de cacau pode ser compensada em termos de ganho de produção, pela elevada concentração de CO₂ na atmosfera. Resultados parecidos foram encontrados por Lahine et al. (2021), que constaram que o CO₂ elevado pode aliviar os impactos negativos da deficiência de umidade do solo. De acordo com Mensah et al. (2023), altas temperaturas e períodos de secas afetam a fisiologia dos cacaueiros através da redução taxas de fotossíntese e transpiração, bem como alterações fisiológicas processos como as funções dos fotossistemas, síntese de clorofila, condutância estomática e expressão de proteínas de choque térmico. Lawal e Omonona (2014) constaram que a elevação da temperatura e da umidade do ar interferem em processos fisiológicos das plantas de cacau no que se refere a produção das vagens.

Além dos problemas relacionados a fisiologia das plantas, outros trabalhos destacam a relação entre mudanças climáticas e o aparecimento de doenças e pragas no cacaueiro. Um estudo conduzido por Kimengsi e Tosam (2013) avaliaram os efeitos das mudanças climáticas sobre a produção de cacau e constaram aumento nas pragas e doenças do cacau atribuídas às essas mudanças. Mais recentemente, a pesquisa de Oyekale e Molelekoa (2024) relacionam as doenças e pragas de cacau às mudanças do clima e que a dificuldade encontrada por produtores de Camarões em controlar essas pragas e doenças estão associados a essas mudanças. O trabalho de

Anning et al. (2022) avaliou as manifestações das mudanças climáticas em fazendas de cacau no Distrito de Adansi South em Gana através da percepção dos agricultores e seus resultados mostram consequências diversas como a morte das plantas, infestação das lavouras por pragas e doenças e até redução da produtividade. Da mesma forma, o artigo de Afele et al (2024) em Gana avaliou a percepções dos cacaucultores dos efeitos das mudanças climáticas sobre a produção de cacau e as respostas consensuais foram: aumento de doenças e pragas, levando a redução dos rendimentos e a morte de alguns cacaueiros. Megbetor e Boateng (2023) também perceberam queda de rendimento do cacau em função de alterações do clima em Gana.

No contexto amazônico existe uma probabilidade de perda de produtividade de cacau promovidas por alterações no clima ao qual deverão ter reflexo em grandes perdas na adequação edafoclimática em cenários futuros de mudanças climáticas (Igawa et al., 2021). Soma-se ainda, que em cenários futuros de alterações climáticas há uma expansão de doenças do cacau, como a *Moniliophthora roreri*, na região equatorial da continente americano (Plasencia-Vázquez et al., 2022), atribuindo mais ameaça para a produção de cacau na região Amazônica.

Neste sentido é necessário investigar sobre os efeitos de variáveis hidroclimáticas sobre a produção de cacau de Mocajuba no presente, tendo em vista, que a área de cultivo no município está situada em ecossistema de várzea do rio Tocantins, podendo sofrer efeitos tanto de variáveis climáticas (precipitação, temperatura, umidade) como de variáveis hidrológicas como a cota e a vazão do rio Tocantins.

Por se tratar de cacau de várzea, a incidência de doenças como a podridão parda já foi mencionada nos plantios de Mocajuba (Barroso et al., 2023), pois o período de frutificação coincide com o período chuvoso da região e consequentemente com o período de maior cheia do rio Tocantins e a elevação do nível do rio atinge parte dos frutos, provocando a doença, uma vez que a principal causa da podridão parda é o excesso de umidade, quando atinge os frutos (Nengsih, 2018). Além de potenciais doenças provocadas pela umidade desses ambientes, a morte de plantas de cacau também é uma consequência atribuída ao ambiente de várzea (Delgado et al., 2016) devido as enchentes cada vez mais intensão nesses ecossistemas, que poderá somar para a redução da produção de Mocajuba. Vale ressaltar que há uma lacuna científica sobre os efeitos das condições

climáticas atuais sobre os cultivos de cacau em ecossistemas de várzea na Amazônia.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de variáveis hidroclimáticas (precipitação, umidade do ar, temperatura e cota máxima do rio Tocantins) sobre a produção de cacau do município de Mocajuba utilizando uma série histórica de 32 anos. Nossa hipótese é que a temperatura influencia positivamente a produção de cacau, uma vez que, essa variável está relacionada com processos fotossintéticos, floração e rendimento dos frutos (Babadele & Agele, 2021), enquanto, que, a umidade, a precipitação e a cota do rio Tocantins influenciam negativamente, pois estão relacionadas a maior ocorrência de doenças (M'bo et al., 2023) como a podridão parda, dentre outras, sobre os frutos e morte de plantas.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi conduzido no município de Mocajuba, PA, situado na porção do baixo Tocantins. O município compõe a Região Geográfica Imediata de Cametá, tem área de 871,171 km² e possui população de 27.198 habitantes com densidade populacional de 31,2 hab.km⁻² (IBGE, 2023).

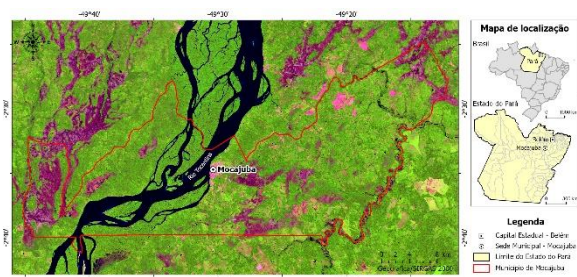


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

Na região onde o município se localiza, predomina o clima quente e superúmido, com temperaturas médias anuais de 27°C, além de temperaturas diárias com registros de 37°C que, de acordo com a classificação de Köppen, enquadra-se no regime tropical equatorial (tropical chuvoso) do tipo Af – clima de floresta tropical. Esta categoria é caracterizada por temperaturas médias sempre acima de 18° C, ventos de baixas velocidades, altos valores de umidade relativa do ar, acima de 85% (Projeto Radam, 1974). A pluviosidade da região, varia entre 2.250 mm a 3.000 mm (Andrade et al., 2017).

Os solos da região são predominantemente hidromórficos, exceção dos que ocorrem nas "icas" ou ilhas de terra firme. No complexo de ilhas existentes, sobretudo, à margem direita do rio, são

individualizados dois domínios fisiográficos. Os tesos ou dique natural, nos quais dominam os solos Gley pouco húmico, com os mais desenvolvidos apresentando uma camada turfosa, a aproximadamente 1 m de profundidade, e a várzea baixa, onde dominam solos aluviais ou orgânicos (Silva et al., 2002).

Banco de Dados

O presente estudo analisou uma série temporal de dados de variáveis hidroclimáticas para verificar a influência dessas variáveis sobre a produção de cacau de Mocajuba. Os dados utilizados nessa pesquisa são de diferentes fontes secundárias:

Os dados anuais de precipitação de Mocajuba do período de 1990 a 2021 são oriundos do produto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation* – CHIRPS. Conforme Funk et al. (2015), o CHIRPS é um conjunto de dados de precipitação de 5 km de resolução espacial. Foi desenvolvido pelo United States Geological Survey (USGS) e pelo Climate Hazards Group at the University of California, Santa Barbara (UCSB). As estimativas de precipitação do produto do CHIRPS são compostas por diversas fontes de informações, como: (I) The Climate Hazards Group's Precipitation Climatology (CHPClim); (II) Observações de satélites com espectroscopia de infravermelho termal (Thermal Infrared, TIR), geoestacionárias quase globais da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Centro de Previsão Climática (CPC) e o National Climatic Data Center Climáticos (NCDC); (III) Campos de Precipitação do Coupled Forecast System da NOAA, versão 2 (CFSv2); (IV) Diversas observações de precipitação oriundas de estações meteorológicas e outros serviços regionais. Os dados do produto CHIRPS do Brasil foram validados por Costa et al., (2019) e recomendados para estudos climáticos em diferentes abordagens.

A série temporal de temperatura do ar de Mocajuba para o período de 1990-2021 foi calculada utilizando dados diários de reanálise do banco de dados *Era-Interim* e *Era5 Land*, estimados por um modelo do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), com resolução de 14 km e 9 km, respectivamente (Inness et al., 2019).

Os dados de umidade relativa do ar de Mocajuba também foram adquiridos do produto de reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), do sistema Copernicus de estudos climáticos, com resolução espacial de 9 km (Cucchi et al, 2020). Os modelos

atmosféricos pertencentes ao ECMWF permitem estimativas em locais onde a cobertura de dados é baixa, com ausência de estações meteorológicas automáticas. O fornecimento de estimativas em cada ponto da grade ao redor do globo para intervalos regulares de uma hora, por um longo período, sempre usando o mesmo formato, torna a reanálise um conjunto de dados muito conveniente e realístico.

Para a caracterização hidrológica do rio, dados de cotas e vazão foram adquiridas por meio do Portal *Hidroweb* da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico – ANA (<https://www.Snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>). As cotas do rio Tocantins foram adquiridas através dos dados da estação fluviométrica Nazaré dos Patos (Latitude: - 3.4467 e Longitude: - 49.6035), operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (atual Serviço Geológico do Brasil – SGB, código 29750000) de 1972 a 2021. As vazões do rio Tocantins, utilizadas neste estudo no período de 1970 a 2015, estão disponíveis na Estação Tucuruí (Latitude: - 3.7578 e Longitude: - 49.6533, código 29700000), situada no município de Tucuruí e operada pela ANA. Essas estações estão situadas a jusante da barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí - UHT nos municípios de Breu Branco e Tucuruí, respectivamente e a montante do município de Mocajuba e seus dados serviram como variáveis hidrológicas, uma vez que, o município de Mocajuba não dispõe de estação fluviométrica.

As estações disponibilizam dados diários de cota e vazão do rio Tocantins, mas apresenta alguns dados não amostrados (lacunas) diários em alguns períodos. Para o preenchimento dessas lacunas, foi utilizada a média aritmética diária do respectivo mês que apresentava a lacuna. Esta é uma técnica utilizada para correção de ausências de dados pluviométricos (Silva & Jardim, 2017; Gao et al., 2018).

Por último, os dados de produção de cacau do município de Mocajuba foram adquiridos no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE por meio do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Este Sistema disponibiliza dados da Produção Agrícola Municipal – PAM de todos os municípios brasileiros desde o ano de 1974, mas para cumprir os objetivos deste estudo, apenas dados de 1990 a 2021 foram utilizados.

Análise de dados

A variabilidade climática de Mocajuba foi analisada em duas escalas mensal e anual, no período de 1990 a 2021, a partir de análises descritivas (média, mediana, erro e desvio padrão, valores máximos e mínimos), com auxílio de

tabelas e gráficos do tipo linha e *boxblot*. A caracterização hidrológica do rio Tocantins foi feita com as variáveis cota no período de 1972 a 2021 e vazão no período de 1970 a 2015 com auxílio de gráficos de linhas das médias, das máximas, mínimas e das médias anuais e mensais. A quantidade anual de produção de cacau em Mocajuba no período de 1990 a 2021 foi apresentada em forma de gráfico de linha.

Para analisar a influência das variáveis hidroclimáticas sobre a produção de cacau utilizou-se uma Análise de Permutação Multivariada (PERMANOVA) através da função “adonis2” do pacote *vegan* (Oksanen et al 2022). As variáveis hidroclimáticas foram as variáveis explicativas e produção de cacau foi a variável resposta. A PERMANOVA foi realizada utilizando uma matriz de distância baseada na métrica de Bray-Curtis, considerando 999 permutações consideradas para testar a significância estatística dos resultados. Essa abordagem permitiu identificar se a variabilidade na produção de cacau poderia estar associada a variações nos fatores hidroclimáticos.

Após a PERMANOVA, realizou-se uma Análise de Componentes Principais (PCA) com as variáveis: (precipitação, umidade do ar, temperatura e cota máxima do rio) para visualizar a distribuição da produção ao longo dos anos e a correlação com variáveis. O objetivo da PCA foi para reduzir a dimensionalidade dos dados e visualizar padrões de variação entre as variáveis preditoras. A PCA ajudou a identificar quais fatores ambientais apresentaram maior contribuição para a variabilidade nos dados, facilitando a interpretação da influência conjunta das variáveis sobre a produção de dados. Devido a série temporal apresentar dados até o ano de 2015, a variável vazão não foi utilizada para as análises.

Para analisar a influência das variáveis hidroclimáticas isoladamente sobre a produção de cacau foi ajustado um Modelo Linear Generalizado (GLM) para modelar a relação entre a produção de cacau e os fatores ambientais (precipitação, temperatura, umidade do ar e cota máxima do rio Tocantins), utilizando a função “glm.nb” do pacote *MASS* (Venables & Ripley, 2002). A produção de cacau foi variável resposta e as variáveis hidroclimáticas (precipitação, umidade do ar, temperatura e cota máxima do rio) foram as variáveis explicativas. O modelo teve uma adequação de distribuição para binomial negativa segundo a função “simulateResiduals” do pacote *DHARMa* (Hartig, 2022). Optou-se pelo modelo GLM por ser uma extensão dos modelos de regressão linear, que permite modelar variáveis que

não seguem distribuição normal (Nelder & Wedderburn, 1972).

Por fim, o modelo foi submetido a uma análise de variância – ANOVA, para analisar quais variáveis preditoras contribui efetivamente para explicar a variável dependente.

Todas as análises estatísticas foram feitas utilizando o Software *R Statistical* (R Core Team, 2022) versão 4.2.1. Para a elaboração dos gráficos foi utilizado o pacote *ggplot2* (Wickham, 2016).

Resultados e discussão

Caracterização climática de Mocajuba

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar em Mocajuba para período climatológico de 32 anos (1990-2021). Neste período, a média anual de precipitação acumulada foi de 2786.2 mm (± 392.1), sendo que o ano mais chuvoso registrado foi 2000, com 3405.9 mm, enquanto o menos chuvoso foi 1992, com apenas 1635.6 mm. A temperatura média anual do período foi de 26.7°C (± 0.4), a maior foi 27.4°C em 2016, enquanto a menor 25.7°C em 1999. A média anual da umidade relativa do ar é de 83.3% (± 1.6) e o ano com maior registro foi 1999 (87.1%), enquanto 2010 apresentou o menor valor (80.6%).

Tabela 1. Estatística descritiva de variáveis climáticas de Mocajuba (período 1990-2021).

	P (mm)	T (°C)	UR (%)
n	32	32	32
Média	2786.2	26.7	83.3
Mediana	2815.8	26.8	83.1
Desvio-padrão	± 392.1	± 0.4	± 1.6
Máximo	3478.1	27.4	87.1
Mínimo	1635.6	25.7	80.6

Observa-se na Figura 2, uma tendência de aumento da precipitação e da temperatura e redução da umidade relativa do ar no período amostral analisado. Observa-se que tanto a temperatura como a precipitação apresentaram uma tendência de aumento ao longo da série temporal, o que mostra o efeito das altas temperaturas na formação de nuvens de tempestades em processos de mesoescala para a região de Mocajuba. Nas últimas duas décadas, as estações chuvosas do nordeste paraense foram mais prolongadas e apresentaram maior volume de chuvas devido ao maior número de ocorrência do fenômeno La Niña que aumenta as chuvas na região (Fernandes Jr. et al, 2025).

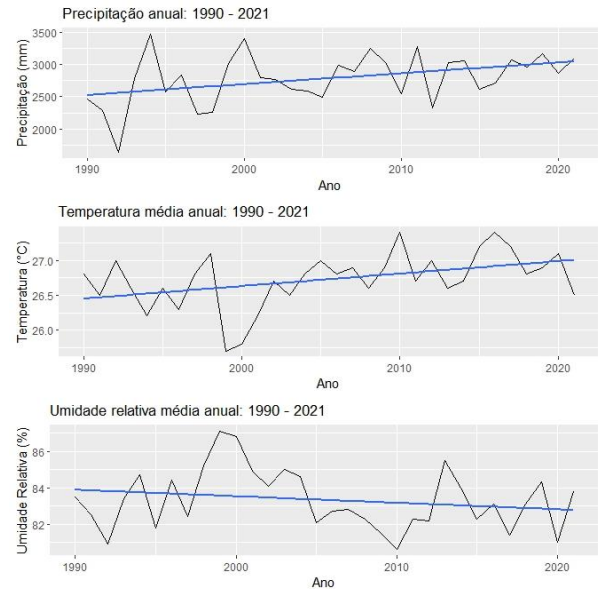


Figura 2. Variação climática anual de Mocajuba referente a precipitação, temperatura e umidade relativa do ar no período de 1990 a 2021.

A Figura 3 mostra a variabilidade climática mensal de Mocajuba para as variáveis precipitação, temperatura e umidade relativa do ar. Nossos resultados mostram que o mês mais chuvoso foi março com média de 488 mm. Por outro lado, setembro foi o mês menos chuvoso com média de 66 mm. Nossas análises mostraram que o município de Mocajuba apresenta duas estações bem definidas: estação chuvosa, com média mensal de chuvas acima de 200 mm, de dezembro a maio e estação menos chuvosa, de junho a novembro, os quais registram volumes médios abaixo de 200 mm. Constatou-se que os seis meses mais chuvosos concentraram 77.8% de total de chuva anual. Em relação a temperatura média mensal, é possível observar que a amplitude térmica média do município foi de 3.2°C, ou seja, varia de 25.3 a 28.5°C nos meses de março e outubro, respectivamente. O mês mais úmido foi março (91.3%) e o menos úmido, agosto (75.1%). A análise do boxplot mostra que no período chuvoso, os dados apresentam maior variabilidade e amplitude na precipitação, fato não constatado no período seco, observado pelo tamanho da caixa. No entanto, a umidade e a temperatura apresentaram comportamento contrário, com menores variabilidade e amplitude no período chuvoso e maior no período seco.

A análise de boxplot também revela assimetrias positivas e negativas na distribuição dos dados em todas as variáveis investigadas e em toda a série temporal, o que pode conter valores discrepantes nos dados.

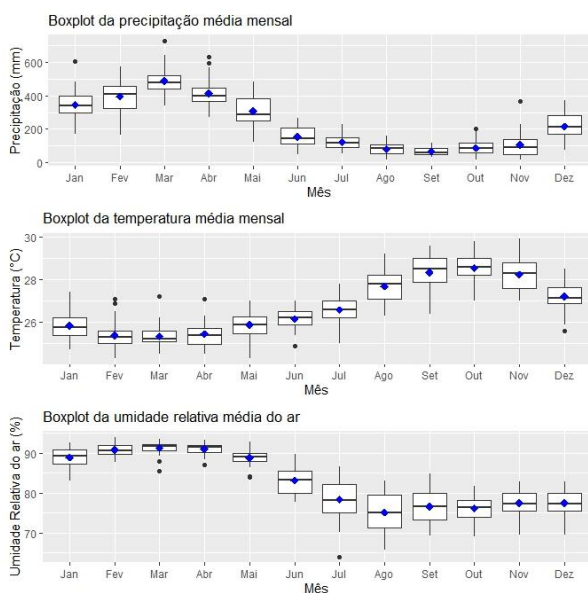


Figura 3. *Boxplot* das variáveis climáticas de Mocajuba: precipitação, temperatura e umidade relativa do ar (período:1990 – 2021), contendo as médias, medianas, interquartis, desvios-padrão, valores máximos e mínimos e extremos (*Outliers*).

Os padrões climáticos observados em Mocajuba, são condizentes com estudos que mostram essas mesmas características típicas de localidades amazônicas, onde o período chuvoso (JAN-MAI) é regido por sistemas meteorológicos geradores de precipitação de várias escalas de tempo e espaço, como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), os quais causam grandes volumes de chuva em localidades sob sua atuação, acentuado transporte de umidade próximo à superfície e baixas temperaturas devido a pouca passagem de radiação solar causada pela espessa camada de nuvens (Souza et al., 2017).

Na fase de transição entre os períodos chuvoso e menos chuvoso, a ZCIT também é responsável, juntamente com as Linhas de Instabilidades (LI), por modular chuvas na Amazônia Oriental (Amanajás & Braga, 2012).

No período menos chuvoso, essas variáveis meteorológicas investigadas tendem a apresentar um comportamento contrário ao do primeiro semestre, sendo regido por sistemas precipitantes de escalas menores, como Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) e, eventualmente, Ondas de Leste vindas da África que podem ganhar magnitude suficiente para alcançar a costa da Amazônia Oriental e causar volumes significativos de precipitação (Ribeiro et al, 2024).

No período analisado (1990-2021) nota-se tendência de aumento da precipitação e da temperatura do ar e uma leve tendência de redução

da umidade relativa do ar em Mocajuba (Figura 2), concordando com os trabalhos Byrne e Gorman (2018) e de Lu e Takle (2010) em outros locais, que observaram em seus trabalhos tendência de aumento de temperatura e da precipitação e redução de umidade relativa do ar. A tendência observada especificamente entre aumento de temperatura e de umidade relativa do ar pode estar associada ao aquecimento dos oceanos (Byrne & Gorman, 2018). Uma pequena redução da umidade relativa do ar pode estar relacionada ao aumento da precipitação (Lu & Takle, 2010).

Nossos resultados também estão de acordo com os trabalhos de Santos et al. (2015), de Souza et al. (2017) e Silva et al. (2019), que observaram aumento de precipitação no estado do Pará e na Amazônia, e também com trabalhos de Penereiro et al. (2018) e de Joseph et al., (2021) que apontam para o aumento de temperatura no bioma amazônico.

O contraste observado entre as variáveis temperatura e umidade do ar (Figura 2), poderá ter implicações sobre o ecossistema florestal e, inclusive, sobre os cultivos de cacau inclusive, pois a redução da umidade do ar e o aumento da temperatura inibe o processo fotossintético das plantas, levando a redução do seu crescimento com efeitos negativos sobre a fisiologia das plantas provocadas por estresse hídrico prolongado (Lysenko et al., 2023), caso essa tendência se mantenha. Além disso, o aumento da temperatura e a redução da umidade relativa deixam as florestas suscetíveis ao fogo devido à diminuição da reciclagem de vapor d'água, secas mais severas e aumento do risco de incêndio (Cook et al., 2010; Xu et al., 2020).

Hidrologia do rio Tocantins

As cotas e vazões máximas, mínimas e médias anuais, além das mensais do Rio Tocantins são apresentadas na (Figura 5). As cotas anuais (Figura 5a), representadas pelas médias da cota máxima, da mínima e da média mostram que o ano com maior cota foi em 1980 com 734 cm, ao passo que 2016 apresentou a menor cota máxima (333 cm). A maior vazão máxima (Figura 5b) observada também ocorreu no ano de 1980 ($22582 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e a menor em 1971 com $7165 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ambos no período que antecede à construção da barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí - UHT.

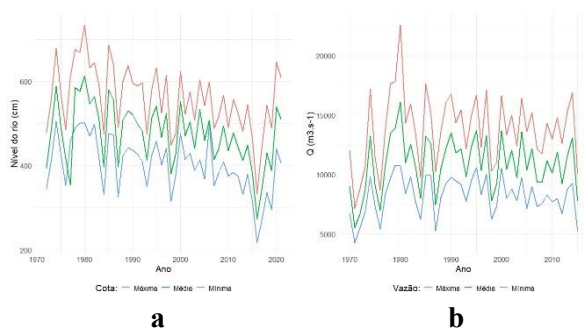


Figura 4. Hidrologia do rio Tocantins: a) cotas anuais máximas, mínimas e médias (período de 1972-2021), na estação Nazaré dos Patos; e b) vazões anuais máximas, mínimas e médias (período de 1970-2015) na estação Tucuruí.

A Figura 6 apresenta as cotas e vazões mensais do rio Tocantins, cujo os maiores valores médios registrados foi no mês de abril, com 952, 761, 868 cm de cota máxima, mínima e média, respectivamente (Figura 6a). A maior vazão mensal ocorre no mês de março com 29288 m³.s⁻¹ (Figura 6b), coincidindo com o mês de maior precipitação no município de Mocajuba.

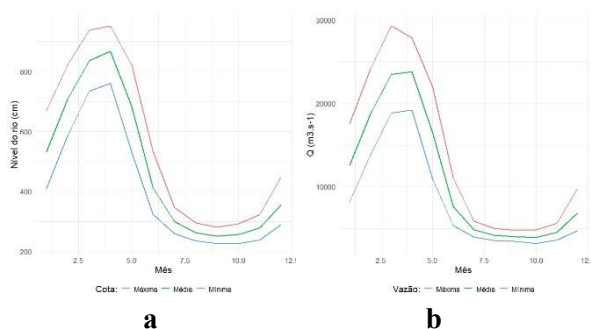


Figura 5. Hidrologia do rio Tocantins. a) cotas mensais máximas, mínimas e médias (1972-2021), na estação Nazaré dos Patos; e b) vazões mensais máximas, mínimas e médias (1970-2015) na estação de Tucuruí.

Nossos resultados mostraram, entre outras mudanças ambientais, que o nível do rio Tocantins, um dos maiores rios da Amazônia, vem diminuindo ao longo da série temporal analisada (32 anos). Marengo e Souza Jr. (2018) mostraram uma tendência de diminuição, tanto no volume quanto na vazão de grandes rios amazônicos, devido ao processo de mudanças climáticas cada vez mais evidente, principalmente, em cenários de degradação florestal como é o caso do Leste paraense. Segundo os autores, a floresta tem papel importante na formação de chuvas locais, contribuindo assim para a manutenção do ciclo hidrológico e para o transporte de umidade. Cisões nestes processos podem provocar severas alterações no nível de grandes rios, como o

Tocantins (Spracklen & Garcia-Carreras, 2015), com sérias consequências ambientais, econômicas e sociais.

Produção de cacau de Mocajuba (1974 - 2021)

A Figura 7 apresenta a produção de cacau no período de 1974 a 2021 com destaque para o período amostral (1990 – 2021). No início da série histórica, a produção de cacau de Mocajuba era de 300 toneladas anuais. Já no início do período amostral, a produção de cacau em Mocajuba foi de 251 toneladas anuais e nos anos de 1996/97 a produção caiu para apenas 33 toneladas com um déficit negativo de 218 toneladas em valores absolutos em relação ao primeiro ano do período amostral. Em 2016, o município registrou a maior produção no período amostral com 546 toneladas e nos últimos dois anos do período de estudo (2020/21), a produção foi de 319 toneladas.

Observa-se uma tendência de aumento da produção de cacau em Mocajuba a partir de 1990, que pode estar relacionada às novas políticas do setor cacauzeiro instaurada com crise do cacau no Brasil. Conforme Venturieri et al (2021), a produção de cacau do estado do Pará aumentou a partir da década de 1990, com foco na expansão sustentável contribuindo para a recuperação de áreas alteradas e redução de incidentes de incêndio.

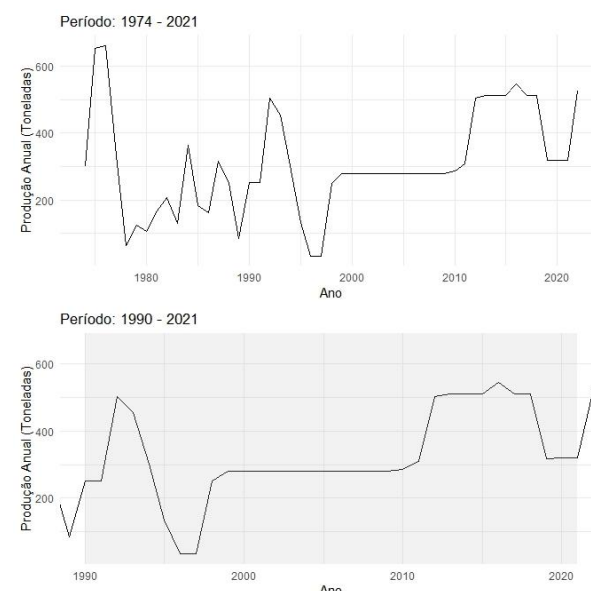


Figura 6. Produção em toneladas de cacau de Mocajuba no período 1974 – 2021, com destaque para 1990 - 2021.

Influência das variáveis hidroclimáticas sobre a produção de cacau

Para avaliar a influência das variáveis hidroclimáticas sobre a produção de cacau utilizou-

se uma Análise de Permutação Multivariada – PERMANOVA. A análise mostrou que as variáveis hidroclimáticas, juntas, influenciam a produção de cacau ($F=2.847$; $R=0.087$; $p=0.041$). Esses resultados sugerem que as características hidroclimáticas de Mocajuba impactam a produção de Cacau do município, mesmo que a estatística explique apenas uma pequena parcela da variabilidade total (8.7%). Essa baixa variabilidade explicativa do modelo indica que outras variáveis, que não estão incorporadas ao modelo, estão influenciando a produção de cacau.

A influência dessas variáveis sobre a produção de cacau em Mocajuba poder estar relacionada a efeitos combinados dessas variáveis como o excesso ou déficit hídrico, temperaturas elevadas e umidade relativa incidentes sobre as lavouras de cacau, e mesmo ainda a elevação da cota do rio Tocantins no período chuvoso com consequência sobre a produção de cacau.

A Análise de Componentes Principais - PCA apresenta, em seus dois primeiros eixos, 78.56% da variação dos dados (50.58% no Eixo 1 e 27.97% no Eixo 2; Tabela 2). No Eixo 1, precipitação e umidade estão relacionadas ao lado positivo, enquanto a temperatura está relacionada ao lado negativo. No Eixo 2, a variável que mais contribui com a formação do eixo é a cota máxima do rio Tocantins (Figura 7).

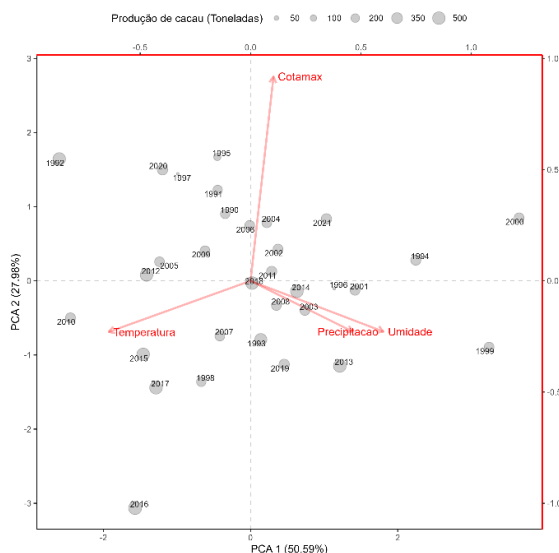


Figura 7. PCA das variáveis hidroclimáticas (precipitação, umidade do ar, temperatura e cota máxima do rio) sobre produção de cacau de Mocajuba nos anos de 1990 a 2021.

A temperatura apresentou forte correlação negativa (-0.914), indicando que a elevação da temperatura reduz a produção de cacau. De forma inversa, os parâmetros precipitação e umidade do

ar apresentaram correlações positivas, indicando que maiores taxas de umidade favorecem a produção de cacau. A cota máxima do rio Tocantins mostrou alta correção positiva no eixo II (0.971), sugerindo que a elevação do nível do rio influencia de forma positiva e independente a produção de cacau, devido, possivelmente, a disponibilidade de água para a irrigação natural dos plantios.

Tabela 2. Tabela com os resultados da PCA contendo os autovetores, autovalores, explicação dos eixos e explicação acumulada para a influência das variáveis hidroclimáticas (precipitação, umidade do ar, temperatura e cota máxima do rio) sobre produção de cacau de Mocajuba nos anos de 1990 a 2021.

	Eixo I	Eixo II
Precipitação	0.658	-0.241
Temperatura	-0.914	-0.243
Umidade Relativa	0.856	0.241
Cota Máxima	0.148	0.971
Autovalor	2.023	1.119
% explicação	50.58	27.97
% exp. acumulada	50.58	78.56

Os resultados obtidos com PERMANOVA mostram que as variáveis analisadas influenciam a produção de cacau, enquanto, que, a PCA mostra as correlações direta entre a produção de cacau com a precipitação (0.658) e umidade do ar (0.856), concordam, em partes, com o trabalho de Yoroba et al (2023) que avaliou os impactos da variabilidade climática sobre a produção de cacau em Costa Marfim no período de 1979 a 2010. Seus resultados mostraram que na região de Goh, o aumento da chuva foi relacionado ao aumento da produção de cacau; já em Marahoué, a temperatura foi considerada com a variável mais importante para a produção de cacau, concordando com estes resultados; e na região Haut-Sassandra, tanto a precipitação como a temperatura têm efeito considerável na produção de cacau.

O trabalho de Lawal e Omonona (2014) avaliou os efeitos da precipitação, da umidade relativa do ar e da temperatura sobre a produção de cacau da Nigéria por meio de regressão e seus achados mostraram que a temperatura e a umidade têm efeito positivo na produtividade, enquanto, que, o excesso de chuvas tem efeito negativo sobre o rendimento do cacau.

O modelo linear generalizado - GLM aplicado ao estudo mostrou que, das variáveis analisadas, apenas temperatura esteve relacionada positivamente com a produção de cacau (Res.Dev.= 35.687; $p=0.041$; Figura 8). As demais variáveis: precipitação (Res.Dev.= 39.587;

$p=0.863$), umidade do ar (Res.Dev.= 34.915; $p=0.379$) e cota máxima do rio (Res.Dev.= 35.525; $p=0.238$) não influenciaram a produção de cacau de Mocajuba. Conforme o modelo, um aumento 1°C de temperatura aumenta em 120 toneladas anuais de cacau (Figura 8).

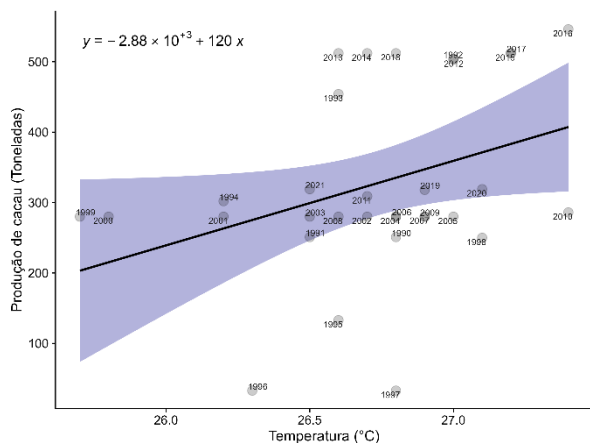


Figura 8. Relação entre a temperatura e a produção de cacau no município de Mocajuba no período amostral (1990-2021).

Esse resultado pode ser em função da faixa de temperatura que o município de Mocajuba está situado com máxima de 27.4°C , mínima de 25.7°C e média de 26.7°C (Tabela 1) e de acordo com Yoroba et al (2019), esta faixa de temperatura favorece o crescimento da produção de cacau.

O resultado do modelo corrobora outros estudos que apontam a influência positiva da temperatura sobre a produção de cacau em várias partes do mundo, utilizando diferentes abordagens estatísticas (Bamba et al., 2024; Bomdzele & Molua, 2023; Etaware, 2023; Lawal & Omonona, 2014; Ojo & Sadij, 2010; Yoroba et al., 2023), isto porque a temperatura está associada a processos fotossintéticos e fisiológicos da planta como floração e rendimentos dos frutos (Babadele & Agele, 2021). Foi que constatou o trabalho de Ojo e Sadij (2010), que avaliou os efeitos das mudanças do clima sobre a produção de cacau da Nigéria utilizando modelo de regressão e seus resultados apontaram influência da temperatura sobre o rendimento dos frutos de cacau.

Nossos resultados, em parte, concordam com o trabalho de Lawal e Omonona (2014), que correlacionaram a produtividade de cacau da Nigéria com parâmetros climáticos (precipitação, temperatura e umidade) e obtiveram correlações positivas entre a produtividade e temperatura e umidade e negativa com a precipitação com o modelo regressivo aplicado. A influência da temperatura sobre a produção de cacau também foi abordada no trabalho de Dand (2011) a partir dos

fenômenos climáticos provocadas pelas anomalias da superfície do mar – TSM, que constatou que nos anos de anomalias positivas, isto é, em anos de El Niño, a produção reduz, enquanto, que, em anos de La Niña, há aumento de produção.

Estudos de modelagem de longo prazo indicam que altas temperaturas podem afetar a produtividade do cacau no continente africano (Ofori-Boateng & Insah, 2014) e na América do Sul (Igawa et al., 2022). O modelo desenvolvido por Ofori-Boateng & Insah (2014) aponta para um aumento gradativo da temperatura e um declínio da precipitação acompanhado pela redução futura da produção de cacau. Na América do Sul, Igawa et al., (2022) observaram que em cenários futuros de mudanças climáticas, as características edafoclimáticas da cultura de cacau serão alteradas com efeito negativo na produção do fruto.

Embora o modelo aplicado para analisar o efeito das variáveis hidroclimáticas sobre a produção de cacau de Mocajuba não tenha apontado influência da precipitação, da umidade do ar e da cota do rio Tocantins sobre a produção de cacau, é importante destacar a relação existente entre essas variáveis em Mocajuba a partir da percepção dos agricultores locais, que, empiricamente relacionam doenças dos frutos, principalmente a podridão parda, a com o aumento da cota do rio Tocantins durante o período chuvoso (Barroso et al., 2023), assim como os eventos extremos de secas provoca a diminuição de safra, sendo necessário investigação futura, em escala de unidade de produção.

O período chuvoso do de Mocajuba (janeiro a junho) coincide com o período de floração e frutificação da maior safra de cacau do município, que ocorre nos meses de maio e junho, e o processo de maturação dos frutos ocorre durante as maiores vazões e cotas do rio Tocantins (março e abril), de modo que a maiores cotas desses meses atingem frutos, provocando doenças e causando prejuízos na produção, conforme reportado em trabalho de Barroso et al. (2023).

Conclusão

Os resultados do estudo confirmam a influência das variáveis hidroclimáticas sobre a produção de cacau de Mocajuba com efeito positivo da temperatura, confirmando parcialmente a hipótese que essa variável influencia positivamente a produção de cacau. No entanto, nossos resultados não foram capazes de mostrar a influência das outras variáveis (precipitação, umidade do ar e cota máxima do rio Tocantins) pelo modelo aplicado.

No período amostral analisado, o município de Mocajuba preserva as características edafoclimáticas da cultura do cacau, mantendo-se em faixas de precipitação, de temperatura e de umidade adequadas para a produção do fruto, porém, há uma tendência de aumento precipitação e de temperatura, que poderá prejudicar as lavouras de cacau de Mocajuba, caso essas variáveis seguirem essa tendência. Por isso, recomenda-se para estudos futuros, o uso de modelos que sejam capazes de analisar as implicações dessas variáveis sobre a produção de cacau em cenários futuros de mudanças climáticas.

Agradecimentos

À Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisa - FAPESPA, pelo financiamento do projeto Cacau das Ilhas de Mocajuba;

Ao Projeto Cacau da Ilha de Mocajuba, pelo apoio financeiro a este trabalho;

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão - FAPEMA pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor.

Referências

- Afele, J.T., Agbenyega, O., Barnes, V.R., Amisah, S., Acheampong, E., Owusu, V., Anokye, J., Asante, R., Opoku, S., Laten, E. & Danquah, E. (2024). Understanding and addressing climate change impacts on cocoa farming in Ghana. *Environmental Challenges* 14. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100823>
- Afele, T.J., Agbenyega, O., Barnes, V.R., Amisah, S., Plauborg, F., Pedersen, S.M., Berg, T.R., Anokye, J., Opoku, S.Y., Asante, R., Nimo, E., & Dawoe, E. (2024). Ghana's Cocoa: Farmers' Perceptions of Climate Change and Its Effect on Yield and Livelihood. *Green and Low-Carbon Economy* 00, 1–11 <https://doi.org/10.47852/bonviewGLCE42023218>
- Almeida, L.C.de, & Brito, A.M. de, (2003). Manejo do cacaueiro silvestre em várzea do estado do Amazonas, Brasil. *Agrotrópica* 15 (1), 47-52.
- Amanajás, J.C., & BRAGA, C.C. (2012). Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. *Revista Brasileira de Meteorologia* 27, 423 - 434.
- Andrade, V.M.S. de, Cordeiro, I.M.C.C., Schwartz, G., Rangel-Vasconcelos, L.G.T., & Oliveira, F.D.A. (2017). Considerações sobre clima e aspectos edafoclimáticos da mesorregião Nordeste paraense. In Cordeiro, I.M.C.C.; Rangel-Vasconcelos, L.G.T.; Schwartz, G.; Oliveira, F. de A. (Orgs.). *Nordeste Paraense: panorama geral e uso sustentável das florestas secundárias*. 59-96. Belém: Edufra.
- Anning, A.K., Ofori-Yeboah, A., Baffour-Ata, F., & Owusu, G. (2022). Climate change manifestations and adaptations in cocoa farms: perspectives of smallholder farmers in the Adansi South District, Ghana. *Current Research in Environmental Sustainability* 4, 1-9 <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100196>
- Asante, P.A., Rahn, E., Anten, N.P.R., Zuidema, P. A., Morales, A., & Rozendaal, D.M.A. (2025). Climate change impacts on cocoa production in the major producing countries of West and Central Africa by mid-century. *Agricultural and Forest Meteorology* 362, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110393>
- Babadele, F.I., & Agele, S.O. (2021). Micro-climate conditions, weed diversity, flowering and yield of young cacao plants as affected by shade regimes. *International Letters of Natural Sciences* 81, 31-41. <https://doi.org/10.56431/p-f18s7i>
- Bamba, A., Yoroba, F., Toure, N'D. E., Kouadio, K., Ouattara, M., M'bo, K., Cherif, M., Kone, D. & Diedhiou, A. (2024). Climate Services Elaboration for Cocoa Cultivation in Côte d'Ivoire: Contribution of CORDEX Climate Projections. *Agricultural Sciences* 15, 358-375. <http://doi.org/10.4236/as.2024.153021>
- Barroso, D.F.R., Dias, E.B.O., Thalês, M.C., Vilhena, M.P.S.P., & Silva, J.F.B.R. (2023, agosto). Aspectos socioprodutivos da cacaucultura em projetos de assentamento agroextrativistas de Mocajuba, PA. In *Congresso Amazônias: ambiente, territórios e desenvolvimento*, Anais do Congresso Amazônias: ambientes, territórios e desenvolvimento "Mudanças climáticas e resiliências amazônicas, Belém, 904-918. Maneschy, R.Q., Flores, M. do S.A (Orgs.).
- Berhane, A. (2018). Climate change and variability impacts on agricultural productivity and food security. *Journal of Climatology & Weather Forecasting* 6, 1-6. <http://doi.org/10.4172/2332-2594.1000240>
- Bezner Kerr, R., Hasegawa, T., Lasco, R., Bhatt, I., Deryng, D., Farrell, A., Gurney-Smith, H., JU, H., Lluch-Costa, S., Meza, F., Nelson, G., Neufeldt, H. & Thornton, P (2022). Food, Fibre, and Other Ecosystem Products. In Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Tignor, M., Polozanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craing, S., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A. & Rama, B. (eds). *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 University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 713–906. <http://doi.org/10.1017/9781009325844.007>
- Black, E., Pinnington, E., Wainwright, C., Lahive, F., Quaife, T., Allan, R.P., Cook, P., Daymond, A., Hadley, P., McGuire, P.C., Verhoef, A., & Vidale, P. L. (2021). Cocoa plant productivity in West Africa under climate change: a modelling and experimental study. *Environmental Research Letters* 16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc3f3>
- Bomdzele, E., & Molua, E.L. (2023). Assessment of the Impact of Climate and Non-Climatic Parameters on Cocoa Production: A Contextual Analysis for Cameroon. *Frontiers in Climate* 5, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1069514>
- Bunn, C., Läderach, P., Quaye, A., Muilerman, S., Noponen, M.R., & Lundy, M. (2019). Recommendation domains to scale out climate change adaptation in cocoa production in Ghana. *Climate Services* 16, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100123>
- Byrne, M.P., & O’Gormam, P.A. (2010). Trends in continental temperature and humidity directly linked to ocean warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, 4863-4868. <https://doi.org/10.1073/pnas.1722312115>
- Cédric, C.D., Delanot, T.A., Owona, J.M.A., Ndzie, S.O., Nforankah, B.N., Enongene, J., Loh, E.C., Fobissie, E., Alemagi, D., Awazi, N.P., Mezafack, K.L., Nkontcheu, P.K., Pougom, S.V.D., Fokou, K.T., Chiteh, K.C., Roger, K.B.L.P., & Fobissie, K. (2025). Determinants of Cocoa Productivity and Vulnerability to Climate Change in Central Cameroon: An In-Depth Analysis of Farmers’ Perspectives. *Green and Low-Carbon Economy* 0, 1-9. <https://doi.org/10.47852/bonviewGLCE52024143>
- Chiu, M., Bakang, J-E. A., Tham-Agyekum, E. K. & Tawiah, F.O. (2023). Perception matters: exploring climate variability, mitigation and the effect on cocoa productivity in Adansi Brofeyedru, Ghana. *International Journal of Food and Agricultural Economics* 11 (3), 175-187. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.339053>
- Cilas, C. & Bastide, P. (2020). Challenges to Cocoa Production in the Face of Climate Change and the Spread of Pests and Diseases. *Agronomy* 10, 1-8. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091232>
- Cizari, A., Mohamed, Z., Shamsudin, M.N. & Seng, K.W.K. (2017). The Effects of Climate Change Phenomena on Cocoa Production in Malaysia. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology* 2, 2599-2604. <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/2.5.42>
- Cook, B., Zeng, N., & Yoon, J.-H. (2010). Climatic and ecological future of the Amazon: likelihood and causes of change. *Earth System Dynamics Discussions* 1, 63-101. <http://doi.org/10.5194/esd-1-63-2010>
- Costa, F.A., Ciasca, B.S., Castro, E. C.C., Barreiros, R.M.M., Folhes, R.T., Bergamini, L.L., Solyno-Sobrinho, A. S., Cruz, A., Costa, A., Simões, J., Almeida, J.S., & Souza, H.M.D. (2021). Bioeconomia da sociobiodiversidade no estado do Pará. Brasília, DF: The Nature Conservancy (TNC Brasil), Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), Natura. Natura, IDB-TN.
- Costa, J., Pereira, G., Siqueira, M.E., Cardozo, F., & Silva, V.V. da. (2019). Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia* 14, 228-243. <https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60237>
- Cucchi, M., Weedon, G.P., Amici, A., Bellouin, N., Lange, S., Müller Schmied, H., Hersbach, H., and Buontempo, C. (2020). WFDE5: bias-adjusted ERA5 reanalysis data for impact studies. *Earth Systems Science Data* 12, 2097–2120. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2097-2020>
- Dakurah, G., Osbahr, H., & Arnall, A. (2024). Smallholder farmers’ cropping decisions in rural North-west Ghana under climate variability and change. *Regional Environmental Change* 24, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02168-2>
- Dand, R. (2011). Environmental and practical factors affecting cocoa production. *The International Cocoa Trade* 65-93. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-125-3.50003-3>
- Danial, M.Z., Junaedi, Kadir, M. (2024). Produktivitas Berbagai Klon Kakao (*Theobroma cacao* L.) Pada Tingkat Cura Hujan Yang Berbeda de Kelurahan Tettikenrae, Kabupaten Soppeng. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan* 2, 80-90. <https://doi.org/10.61119/prp.v2i1.498>
- Delgado, C., Penn, J., & Couturier, G. (2016). Status of cacao trees following seasonal floods in major watersheds of the Peruvian Amazon.

- Agricultural Science 4, 15-24. <http://dx.doi.org/10.12735/as.v4n2p15>
- Dhamira, A., & Anggrasari, H. (2024). Indonesian Climatic Factors and Its Effect on Cocoa Productivity. *West Science Interdisciplinary Studies* 2, 963-974. <https://doi.org/10.58812/wsis.v2i05.873>
- Etaware, P. M. (2023). Critical evaluation of the agro-ecological system of the Republic of South Africa (30° S) in response to unclassified claims of cocoa farming beyond 20° S of the equator. *Plos One* 18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289873>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2, 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gao, Y., Merz, C., Lischeid, G., & Schneider, M. (2018). A review on missing hydrological data processing. *Environmental earth sciences* 77, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7228-6>
- Hartig F. (2022). DHARMa: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. R package version 0.4.6, <https://CRAN.Rproject.org/package=DHARMa>.
- Igawa T.K. Toledo, P.M., & Anjos, L.J.S. (2022). Climate change could reduce and spatially reconfigure cocoa cultivation in the Brazilian Amazon by 2050. *Plos One* 17, 1-14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262729>
- Igawa, T. K., Anjos, L. J. S. dos & Toledo, P. M. de. (2021). Climate change and cacao production in the Brazilian Amazon biome. *Agroecosistemas* 13, 120 – 134.
- Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J.J., Engelen, R., Esjes, H., Flemming, J., Huijinen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz M. & Suttie, M. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, 3515-3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). Relação da População dos Municípios para publicação no DOU em 2023. https://ftp.ibge.gov.br/Informacoes_Gerais_e_Referencia/Relacao_da_Populacao_dos_Municipios_para_publicacao_no_DOU_em_2023/POP_DOU_2023_Municipios_POP2022_Malha2023.pdf
- Jardim, C.H., & Silva, A.A.F. (2017). Aplicação de técnicas de preenchimento de falhas de dados de pluviosidade mensal e anual para o noroeste do estado de Minas Gerais-Brasil. *Revista Geografias* 13, 83-106. <https://doi.org/10.35699/2237-549X.2017.16058>
- Joseph, W., Souza, A.P., & Sabino, M. (2021). Índices de extremos de temperatura do ar na Amazônia brasileira. *Confins - Revista Franco-Brasileira de Geografia* 52. <https://doi.org/10.4000/confins.41520>
- Junior Fernandes, E.S., de Moraes, F.R.D.C., Sodrê, G.R.C., Junior, J.D.A.S., & Rodrigues, H. J.B. (2025). Análise da variabilidade da precipitação e eventos extremos em Acará-PA. *Brazilian Journal of Development* 11, 1-20. <https://doi.org/10.34117/bjdv11n1-029>
- Kenneth, O.B. & Baba, I. (2011). An empirical analysis of the impact of climate change on cocoa production in selected countries in West Africa. *Journal of Sustainable Development in Africa* 13, 24-50.
- Kimengsi, J.N., & Tosam, J.N. (2013). Climate variability and cocoa production in Meme Division of Cameroon: agricultural development policy options. *Greener Journal of Agricultural Sciences* 3, 606-617. <https://doi.org/10.15580/GJAS.2013.8.022713505>
- Lahive, F., Hadley, P., & Daymond, A.J. (2019). The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 39, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0552-0>
- Lahive, F., Handley, L.R., Hadley, P., & Daymond, A. J. (2021). Climate Change Impacts on Cacao: Genotypic Variation in Responses of Mature Cacao to Elevated CO₂ and Water Deficit. *Agronomy* 11, 1-15. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050818>
- Lawal, J. O., & Omonona, B. T. (2014). The effects of rainfall and other weather parameters on cocoa production in Nigeria. *Communicata Scientiae* 5, 518-523. <https://doi.org/10.14295/cs.v5i4.365>
- Lu, E., & Takle, E.S. (2010). Spatial variabilities and their relationships of the trends of temperature, water vapor, and precipitation in the North American Regional Reanalysis. *Journal of Geophysical Research* 115, 1-11. <https://doi.org/10.1029/2009JD013192>
- Lysenko, E.A., Kozuleva, M.A., Klaus, A.A., Pshybytko, N.L., & Kusnetsov, V.V. (2023). Lower air humidity reduced both the plant growth and activities of photosystems I and II

- under prolonged heat stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 194, 246-262. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.11.016>
- M'bo, A.A.K., Cherif, M., Kouadio, K., Adolphe, M.G., Bamba, A., Toure, E.N.D., Okou, A.K., Brunelle, R., Rouseau, Y & Koné, D. (2023). Climate Variability and Outlook of Cocoa Production in Côte D'ivoire under Future Climate. In Agele, S., Ibiremo, O. (eds). *Shifting Frontiers of Theobroma Cacao- Opportunities and Challenges for Production*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.112643>
- Mahato, A. (2014). Climate change and its impact on agriculture. *International journal of scientific and research publications* 4, 1-6. <http://www.ijsrp.org/research-paper-0414.Php?rp=P282518>
- Marengo, J.A.; Souza Junior, C. (2018). Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia. São Paulo: ALANA. https://www.oamanhae hoje.org.br/assets/pdf/Relatorio_Mudancas_Climaticas-Amazonia.pdf
- Megbetor, E., & Boateng, S. (2023). Examining the Implications of Climate Change and Adaptation Technologies on the Livelihood of Cocoa Farmers in Offinso Municipalities, Ghanas. *Journal of Environmental Science and Economics* 2, 86-108. <https://doi.org/10.56556/jescae.v2i3.641>
- Mensah, E.O., Vaast, P., Asare, R., Amoatey, C.A., Owusu, K., Asitoakor, B.K, & Ræbild, A. (2023). Cocoa Under Heat and Drought Stress In Olwig, M.F., Bosselmann, A.S., & Owusu, K. (eds.). *Agroforestry as Climate Change Adaptation: The Case of Cocoa Farming in Ghana*, Cham: Springer International Publishing. 35-57. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-45635-0>
- Moraes; V. H. F. & Bastos, T. X. (1972). Variedade e limitações climáticas para as culturas permanentes, semipermanentes e anuais com possibilidades de expansão na Amazônia. In. *Zoneamento agrícola da Amazônia (Boletim Técnico)*, n. 54, Belém: IPEAN.
- Motamayor, J.C., Risterucci, A.M., Lopez, P.A., Ortiz, C.F., Moreno, A., & Lanaud, C. (2002). Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity* 89, 380-386. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800156>
- Nelder, J.A., & Wedderburn, R.W.M. (1972). Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society* 135, 370-384. <https://doi.org/10.2307/2344614>
- Nengsih, Y. (2018). Teknik pengemasan benih kakao (*Theobroma cacao* L) dalam penyimpanan. *Jurnal Media Pertanian* 3, 89-98. <http://dx.doi.org/10.33087/jagro.v3i2.69>
- Ofori-Boateng, K., & Insah, B. (2014). The impact of climate change on cocoa production in West Africa. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 6, 296-314. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-01-2013-0007>
- Ojo, A. D., & Sadiq, I. (2010). Effect of climate change on cocoa yield: a case of cocoa research institute (CRIN) farm, Oluyole local government Ibadan Oyo State. *Journal of Sustainable Development in Africa* 12, 350-358.
- Oksanen, J., Simpson, G., Blanchet, F., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P., O'Hara, R., Solymos, P., Stevens, M., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Carvalho, G., Chirico, M., De Caceres, M., Durand, S., Evangelista, H., FitzJohn, R., Friendly, M., Furneaux, B., Hannigan, G., Hill, M., Lahti, L., McGlinn, D., Ouellette, M., Ribeiro Cunha, E., Smith, T., Stier, A., Ter Braak, C., & Weedon, J. (2022). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.6-4, <https://CRAN.Rproject.org/package=vegan>
- Olwig, M.F., Asare, R., Meilby, H., Vaast, P., & Owusu, K. (2023). Introduction: climate, cocoa and trees. In: Olwig, M.F., Bosselmann, A.S., & Owusu, K. (eds.). *Agroforestry as Climate Change Adaptation: The Case of Cocoa Farming in Ghana*. Cham: Springer International Publishing 1-33. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-45635-0>
- Osei, A.M., Egyir, I.S., & Gordon. C. (2018). Effects of Rainfall and Temperature Variability on Cocoa Production in the Dormaa West District of the Brong-Ahafo Region, Ghana. *Journal of Energy and Natural Resource Management* 1, 29-35. <https://doi.org/10.26796/jenrm.v1i2.134>
- Oyekale, A.S., & Molelekoa, T.C. (2024). Perceived Phytosanitary Impacts of Climate Change and Climate Change Adaptation among Cocoa Farmers in Cameroon. *Research in Agriculture, Livestock and Fisheries* 11, 215-230. <https://doi.org/10.3329/ralf.v11i2.76069>
- Penereiro, J.C., Badinger, A., Maccheri, N.A., & Meschiatti, M.C. (2018). Distribuições de tendências sazonais de temperatura média e precipitação nos biomas brasileiros. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33, 97-113. <https://doi.org/10.1590/0102-7786331012>
- Plasencia-Vázquez, A.H., Vilchez-Ponce, C.R., Ferrer-Sánchez, Y. & Veloz-Portillo, C.E. (2022). Efecto del cambio climático sobre la

- distribución potencial del hongo *Moniliophthora roreri* y el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en Ecuador continental. *Terra Latinoamericana* 40, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1151>
- Projeto RadamBrasil. (1974). Folha SA.22 Belém: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro.
- R Core Team. (2022). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.Rproject.org/>.
- Ribeiro, R.M.R., Vitorino, M.I., Moura, M.N., & Sodré, G.R.C. (2024). Distúrbio Ondulatório de Leste sobre a costa da Amazônia Oriental. *Revista Brasileira De Geografia Física* 17, 69–83. <https://doi.org/10.26848/rbgf.V17.1.p69-83>.
- Santos, E.B., Lucio, P.S., & Silva, C.M.S. (2015). Análise de tendência da precipitação diária na Amazônia Brasileira. *Revista Brasileira de Geografia Física* 8, 1041-1052. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150052>
- Sasmita, K.D., Wardiana, E., Pranowo, D., Aunillah, A., Izzah, NK, Herman, M., ... & Listyati, D. (2024). Challenges and Opportunities for Indonesian Cocoa Development in the Era of Climate Change. In Agele, S., Ibiremo, O. (eds). *Shifting Frontiers of Theobroma Cacao-Opportunities and Challenges for Production*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.112643>
- Silva, A.A.F., & Jardim, C.H. (2017). Aplicação de técnicas de preenchimento de falhas de dados de pluviosidade mensal e anual para o noroeste do estado de Minas Gerais - Brasil. *Geografias* 13. <https://doi.org/10.35699/2237-549X.2017.16058>
- Silva, L.G.T., Silva, B.N.R. da. & Rodrigues, T.E. (2002). Análise fisiográfica das várzeas do Baixo Tocantins: uma contribuição ao manejo e desenvolvimento dos sistemas de uso da terra. - Belém: Embrapa Amazônia Oriental. 34p.
- Slave, C., & Man, C. (2012): The contribution of human activities to climate changes. In *Agrarian Economy and Rural Development - Realities and Perspectives for Romania*. 3rd Edition of the International Symposium, October 2012, Bucharest, The Research Institute for Agricultural Economy and Rural Development (ICEADR), Bucharest, 292-295.
- Souza, E.B., Ferreira, D.B.S., Guimarães, J.T.F., Franco, V.S., Azevedo, F.T.M. & Souza, P.J.O. P. (2017). Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental. *Revista Brasileira De Climatologia* 21, 81-93. <https://doi.org/10.5380/abclima.v21i0.41232>
- Spracklen, D.V. & Garcia-Carreras, L. (2015). The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophysical Research Letter* 42, 9546–9552. <https://doi.org/10.1002/2015GL066063>
- Trenberth, K.E. (2018). Climate change caused by human activities is happening and it already has major consequences. *Journal of Energy & Natural Resources Law* 36, 463-481. <https://doi.org/10.1080/02646811.2018.1450895>
- Venables, W.N. & Ripley, B.D. (2002). *Modern Applied Statistics with S-PLUS*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0.
- Venturieri, A., de Oliveira, R.R.S., Igawa, T.K., Fernandes, K.D.A., Adami, M., de Oliveira Júnior, M.C.M., Almeida, C.A., Silva, L.G.T., Cabral, A.I.R., Pinto, J.F.K.C., Menezes, A.J.A. & Sampaio, S.M.N. (2022). The sustainable expansion of the cocoa crop in the state of Pará and its contribution to altered areas recovery and fire reduction. *Journal of Geographic Information System* 14, 294-313. <https://doi.org/10.4236/jgis.2022.143016>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4. Disponível em: <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- Xu, X., Jia, G., Zhang, X., Riley, W. J., & Xue, Y. (2020). Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. *Global Change Biology* 26, 5874-5885. <https://doi.org/10.1111/gcb.15279>
- Yoroba, F., Kouadio, K., Kouassi, B. K., Doumbia, M., Diawara, A., Bernard, K. D., Naabil, E., & Tiemoko, D. T. (2023). Evaluating the Impacts of Climate Variability on Cocoa Production in the Western Centre of Cote d'Ivoire during 1979-2010. *Atmospheric and Climate Sciences* 13, 201-224. <https://doi.org/10.4236/acs.2023.132012>
- Yoroba, F., Kouassi, B.K., Diawara, A., Yapo, L. A. M., Kouadio, K., Tiemoko, D. T., Kouadio, Y. K., Koné, I.D. & Assamoi, P. (2019). Evaluation of rainfall and temperature conditions for a perennial crop in tropical wetland: a case study of cocoa in Côte d'Ivoire. *Advances in Meteorology* 2019, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2019/9405939>