

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 24/10/2025

At the author's request, the full text of this thesis will not be available online until
Oct. 24, 2025

DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO

**VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR E
BALANÇO HÍDRICO DE MOÇAMBIQUE**

Botucatu

2025

DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO

**VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR E
BALANÇO HÍDRICO DE MOÇAMBIQUE**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Doutor Alexandre Dal Pai

Botucatu

2025

F363v Fernando, Domingos Mário Zeca
Variabilidade temporal e espacial da temperatura do ar e
balanço hídrico de Moçambique / Domingos Mário Zeca
Fernando. -- Botucatu, 2025
101 p. : tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Alexandre Dal Pai

1. Regime pluviométrico. 2. Tendência térmicas. 3.
Balanço hídrico climatológico. 4. Planejamento agrícola.
5. Disponibilidade hídrica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados
fornecidos pelo autor(a).




CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE:

VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR E BALANÇO
HÍDRICO DE MOÇAMBIQUE

AUTOR: DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, pela
Comissão Examinadora:
Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas Unesp
Prof. Dr. PAULO ANDRÉ DE OLIVEIRA (Participação Presencial)
Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu
Pesquisador Dr. MARCUS VINÍCIUS CONTES CALÇA (Participação Presencial)
Tecnologia da Informação / Escola Senai Luiz Massa
Prof.ª Dr.ª VALÉRIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - Unesp
Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas - Unesp

Botucatu, 24 de abril de 2025

Dedico este trabalho à Amina Berta
e nossos filhos Otoniel, Quézia e Bezaliel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida, pela minha saúde mental e física...

À minha família pelo apoio e incentivo...

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, pela orientação e pelo apoio psicológico...

Aos colegas do Laboratório de Agrometeorologia, pelo apoio técnico e científico...

À todas as famílias brasileiras em diferentes cidades e estados, por terem me recebido de uma forma tão maravilhosa...

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP em geral e ao programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola...

À Universidade Púnguè em Moçambique pela bolsa de estudos concedida...

E aos amigos...

"... quem rega também será regado."

Provérbios 11:25

RESUMO

A compreensão da variabilidade da precipitação e da temperatura, bem como do balanço hídrico em uma localidade específica, é essencial para a gestão hídrica e o planejamento agrícola sustentável. Este estudo analisou a evolução da precipitação acumulada anual, da temperatura média anual e do balanço hídrico climatológico em Moçambique de 1994 a 2023, utilizando dois conjuntos de dados geoespaciais: *ERA5-Land*, do Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo (ECMWF), e o CHIRPS, desenvolvido *pelo Climate Hazards Group*. Procedeu-se ao cálculo dos acumulados anuais da precipitação, da média anual da temperatura, dos desvios padrão anuais e das variabilidades interanuais para cada província, tomando os centroides provinciais como referência espacial. Foi aplicada uma regressão linear para identificar tendências térmicas ao longo das três décadas. O método de *Thornthwaite e Mather (1955)* foi aplicado para estimar a evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR) e quantificar a deficiência (DEF) e o excedente hídrico (EXC). Os resultados obtidos indicam uma redução média de 55 mm (-5,48%) na precipitação anual, afetando principalmente Gaza, Sofala e Niassa, e um aumento médio de 0,6°C na temperatura, mais pronunciado no Sul (+0,6°C) e no centro (+0,5°C). Os anos mais secos foram 2002 e 2015, enquanto 2000 e 2023 registraram os maiores volumes pluviométricos. Os picos térmicos ocorreram em 2019 e 2020, coincidindo com períodos de baixa precipitação. O balanço hídrico demonstra que a precipitação média anual (1004,8 mm) não foi suficiente para compensar a elevada ETP (1208,1 mm), resultando num DEF médio de 424 mm e num EXC de apenas 274,2 mm. O Sul apresentou os maiores déficits hídricos, com Gaza a atingir 565 mm, enquanto a região central, em particular as provinciais de Sofala e Zambézia, registrou um EXC mais elevado (401,9 mm e 443,9 mm, respectivamente), refletindo uma melhor recarga hídrica. No Norte, Cabo Delgado apresentou o maior EXC (539,8 mm), enquanto Nampula e Niassa enfrentaram DEF consideráveis. A intensificação da DEF ao longo das décadas, associada ao aumento da ETP, evidencia a necessidade de estratégias de adaptação para mitigar os impactos da variabilidade climática e garantir a estabilidade hídrica e agrícola. Embora as mudanças observadas sejam inferiores às projeções climáticas globais e regionais, os seus impactos já afetam a segurança hídrica e agrícola do país, tornando urgente a adoção de estratégias de adaptação e gestão sustentável dos recursos hídricos.

Palavra-chave: regime pluviométrico; tendência térmica; balanço hídrico climatológico; planejamento agrícola; disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

Understanding the variability of rainfall and temperature, as well as the water balance in a specific location, is a crucial element for water management and agricultural planning. This study investigates the evolution of accumulated annual rainfall, mean annual temperature and climatological water balance in Mozambique between 1994 and 2023, using two geospatial datasets: ERA5-Land, produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), and CHIRPS, developed by the Climate Hazards Group. The annual accumulated rainfall, annual average temperature, annual standard deviations and inter-annual variability were calculated for each province, using the provincial centroids as a spatial reference. Linear regression was applied to identify thermal trends over the three decades. The Thornthwaite and Mather (1955) method was applied to estimate potential evapotranspiration, actual evapotranspiration and quantify water deficiency and water surplus. The results obtained indicate an average reduction of 55 mm (-5.48%) in annual rainfall, mainly affecting Gaza, Sofala and Niassa, and an average increase of 0.6°C in temperature, more pronounced in the south (+0.6°C) and centre (+0.5°C). The driest years were 2002 and 2015, while 2000 and 2023 recorded the highest rainfall volumes. Thermal peaks occurred in 2019 and 2020, coinciding with periods of low rainfall. The water balance shows that the average annual rainfall (1004.8 mm) was not enough to compensate for the high potential evapotranspiration (1208.1 mm), resulting in an average water deficiency of 424 mm and a water surplus of only 274.2 mm. The south showed the biggest water deficits, with Gaza reaching 565 mm, while the central region, in particular the provinces of Sofala and Zambezia, recorded a higher water surplus (401.9 mm and 443.9 mm, respectively), reflecting better water recharge. In the north, Cabo Delgado had the highest water surplus (539.8 mm), while Nampula and Niassa faced considerable water deficiency. The intensification of water deficiency over the decades, associated with the increase in potential evapotranspiration, highlights the need for adaptation strategies to mitigate the impacts of climate variability and guarantee water and agricultural stability. Although the observed changes are lower than global and regional climate projections, their impacts are already affecting the country's water and agricultural security, making it urgent to adopt adaptation strategies and sustainable management of water resources.

Keywords: rainfall patterns; thermal trends; climatological water balance; agricultural planning; water availability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1 - EVOLUÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA E DA TEMPERATURA MÉDIA ANUAL EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS

.....	27
Figura 1 - Localização geográfica de Moçambique com destaque para as províncias e os centroides utilizados na análise climática.....	30
Figura 2 - Variabilidade interanual da precipitação (1994-2023) nas províncias do sul de Moçambique.....	37
Figura 3 - Variabilidade da precipitação (1994-2023) nas províncias do centro de Moçambique.....	39
Figura 4 - Variabilidade da precipitação (1994-20023) nas províncias do norte de Moçambique	41
Figura 5 - Tendência da Temperatura anual (1994-20023) nas províncias do sul de Moçambique	45
Figura 6 - Tendência da Temperatura anual (1994-20023) nas províncias do centro de Moçambique	48
Figura 7 - Tendência da Temperatura anual (1994-20023) nas províncias do norte de Moçambique	51
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS	55
Figura 8 - Localização de Moçambique e localização geográfica dos centroides de cada província.....	58
Figura 9 - Balanço hídrico climatológico no período de 30 anos (1994 – 2023) para a região sul de Moçambique (Maputo, Gaza e Inhambane) DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico; ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; Precipitação	64
Figura 10 - Balanço hídrico climatológico no período de 30 anos (1994 – 2023) para a região centro de Moçambique (Sofala, Manica Zambézia e	

	Tete) DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico; ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; Precipitação	67
Figura 11 -	Balanço hídrico climatológico no período de 30 anos (1994 – 2023) para a região norte de Moçambique (Sofala, Manica Zambézia e Tete) DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico; ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; P: precipitação	70
Figura 12 -	Balanço hídrico climatológico decenal (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023) para a província de Maputo, Gaza, e Inhambane, - ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; Precipitação; DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico	77
Figura 13 -	Balanço hídrico climatológico decenal (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023) para a província de Sofala, Manica, Tete e Zambézia - ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; P: precipitação DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico	81
Figura 14 -	Figura 14 Balanço hídrico climatológico decenal (1994-2003, 2004-2013, e 2014-2023) para a província de Nampula, Niassa e Cabo Delgado - ETP: Evapotranspiração potencial; ETR: Evapotranspiração real; P: precipitação DEF: Deficiência hídrica; EXC: Excedente hídrico	86

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - EVOLUÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA E DA TEMPERATURA MÉDIA ANUAL EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS		27
Tabela 1 -	Dados meteorológicos geoespaciais utilizados no estudo	32
Tabela 2 -	Informações geográficas de centroides de cada província de Moçambique	33
Tabela 3 -	Estatísticas descritivas da precipitação e da temperatura média anual no período entre 1994 e 2023	35
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS		55
Tabela 4 -	Dados meteorológicos geoespaciais utilizados no estudo	59
Tabela 5 -	Informações geográficas de centroides de cada província de Moçambique	60
Tabela 6 -	Variáveis do balanço hídrico acumulados médios anuais em Moçambique (1994 – 2023)	73
Tabela 7 -	Variáveis do balanço hídrico na região sul por década	78
Tabela 8 -	Variáveis do balanço hídrico na região centro por década	83
Tabela 9 -	Variáveis do balanço hídrico na região norte por década	87

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	25
CAPÍTULO 1 - EVOLUÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA E DA TEMPERATURA MÉDIA ANUAL EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS.....	27
1.1 INTRODUÇÃO	30
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	30
1.2.1 Área de Estudo	30
1.2.2 Fonte de Dados	31
1.2.3 Análise Estatística	33
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
1.3.1 Variabilidade da precipitação interanual acumulada em Moçambique ...	36
1.4 CONCLUSÕES	54
1.5 REFERÊNCIAS	55
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO EM MOÇAMBIQUE DURANTE UM PERÍODO DE 30 ANOS	55
2.1 INTRODUÇÃO	57
2.2 MATERIAL E METODOS	57
2.2.1 Área de Estudo	57
2.2.2 Fonte de Dados Climáticos	59
2.2.3 Cálculo do Balanço Hídrico	60
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
2.3.1 Análise do Balanço hídrico Climatológico anual em Moçambique	63
2.3.2 Análise da variabilidade hídrica decenal em Moçambique	76
2.4 CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS	92
CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
REFERÊNCIAS GERAL	103

INTRODUÇÃO GERAL

Moçambique localiza-se na costa sudeste de África entre latitudes 10°27' e 26°52' sul, e as longitudes 30°12' e 40°51' leste. Com uma área territorial de 799.380 km², o país é banhado pelo Oceano Índico (Hoguane, 2007; INE, 2020; Bento *et al.*, 2023). Cerca de 44% do território moçambicano é planície, maioritariamente na parte sul do Save, apresentando altitudes inferiores a 200m (Dos Muchangos, 1999). O planalto moçambicano é de cerca de 51% com altitudes entre 200 m e 1000 m, observados com maior frequência no Norte e centro do país. Os últimos 5% são constituídos por montanhas de faixas não contínuas, onde o ponto mais alto localiza-se na província de Manica com altitude de 2436m (Dos Muchangos, 1999).

A base de desenvolvimento de Moçambique é a agricultura, mas por ser predominantemente uma agricultura de subsistência e caracterizada por baixos níveis de produção e de produtividade, desafios relacionados ao uso de tecnologia para irrigação, secagem e armazenamento de produtos agrícolas tem sido apontado como fatores preponderantes para mudar o quadro atual do sistema agrícola em Moçambique (Beekman; Veldwisch, 2016; Chichango *et al.*, 2023). Pela localização geográfica de cada província e suas potencialidades agrícolas, estudos sobre análise da precipitação, temperatura do ar e do balanço hídrico, podem contribuir com os desafios dos sistemas agrícolas moçambicanos.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima de Moçambique é caracterizado por uma variação bastante diversificada, influenciada por fatores geográficos e meteorológicos, com a predominância do Oceano Índico (Ferrier; Ruppel, 2025). O interior do sul de Moçambique é classificado como clima árido e semiárido quente (BWh e BSh) enquanto o centro e norte são, predominantemente, classificados como clima subtropical úmido (Cwa e Cwb), com inverno seco (Hoguane, 2007; Ferrier; Ruppel, 2025). A vasta costa do país e uma parte da região norte é dominada pelo clima tropical de savana úmida (Aw) (Hoguane, 2007; Ferrier; Ruppel, 2025). O país apresenta duas estações bem definidas: a estação chuvosa e quente, que se concentra entre novembro e maio, período em que ocorre a maior parte da precipitação anual, com valores aproximados de 1200 mm, e a estação seca e fria, entre abril e outubro (Manhique *et al.*, 2023).

A temperatura média anual apresenta variações latitudinais e topográficas. No sul, as temperaturas médias anuais situam-se em torno dos 23 °C, enquanto no norte,

especialmente nas áreas costeiras, a média anual é de 26 °C. A região centro, que abrange províncias como Sofala, Manica e Zambézia, apresenta uma variação média anual entre 24°C e 25°C, com oscilações influenciadas pela altitude e pela proximidade ao Oceano Índico.

Diante das atuais mudanças climáticas, a compreensão da precipitação e da temperatura, não só de forma global, mas também local, é crucial para vários setores, tendo em conta que estes fatores climáticos influenciam significativamente as condições ambientais, a gestão de recursos e as atividades económicas (Tiwari *et al.*, 2024). A interação entre a temperatura e a precipitação pode determinar a produtividade agrícola, a disponibilidade de recursos hídricos, a saúde do ecossistema e definir padrões para o desenvolvimento de estratégias adaptativas às mudanças climáticas, garantindo a sustentabilidade, (Tiwari *et al.*, 2024; Flanagan, 2024; Jaya *et al.*, 2020).

O exposto anteriormente confere à presente investigação sobre a variabilidade da temperatura e da precipitação em Moçambique uma relevância local no apoio à tomada de decisões. O presente estudo encontra-se estruturado em dois capítulos sucessivos, desenvolvidos de maneira sequencial com o propósito de assegurar a coerência conceitual e a continuidade na abordagem dos objetivos da pesquisa. O primeiro capítulo apresenta uma análise da evolução da precipitação anual acumulada e da temperatura média anual em Moçambique, num período de 30 anos. O segundo capítulo, por sua vez, apresenta uma análise do balanço hídrico climatológico em Moçambique durante o mesmo período de 30 anos.

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 24/10/2025

At the author's request, the full text of this thesis will not be available online until
Oct. 24, 2025

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa sobre a variabilidade temporal e espacial da temperatura do ar e do balanço hídrico climatológico em Moçambique, ao longo de três décadas (1994–2023), permitiu identificar tendências climáticas significativas que impactam diretamente a segurança hídrica e a sustentabilidade agrícola do país. Ao articular os resultados dos dois capítulos, um centrado na evolução da precipitação e temperatura, e outro na dinâmica do balanço hídrico, foi possível construir um diagnóstico climático robusto, com implicações diretas para a formulação de políticas públicas, gestão de recursos naturais e adaptação às mudanças climáticas.

A análise revelou uma redução média de 55 mm na precipitação anual acumulada e um aumento médio de 0,6 °C na temperatura, com padrões espaciais distintos entre as regiões. O Sul do país, particularmente a província de Gaza, demonstrou ser a mais vulnerável à seca, evidenciada tanto pelas quedas acentuadas na precipitação quanto pelos aumentos térmicos mais expressivos. A Região Centro, com destaque para Sofala e Zambézia, mostrou maior resiliência hídrica, evidenciada por excedentes hídricos significativos durante o período chuvoso. Já o Norte, embora tenha registrado volumes pluviométricos elevados, também apresentou deficiências hídricas marcantes na estação seca, refletindo forte sazonalidade e elevada dependência da chuva.

O balanço hídrico climatológico, estimado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), confirmou que a evapotranspiração potencial supera, em média, os volumes de precipitação, resultando em um déficit hídrico persistente ao longo do ano, sobretudo entre abril e outubro. Esta condição é agravada pela elevação da temperatura média, que intensifica a perda de água por evaporação e transpiração, elevando a pressão sobre os recursos hídricos disponíveis e comprometendo a produtividade agrícola, especialmente das culturas de sequeiro.

A tendência crescente da deficiência hídrica ao longo das décadas, mesmo em um contexto de leve recuperação pluviométrica na década final do período analisado, evidencia que os efeitos do aquecimento regional superam os ganhos eventuais em precipitação. Os resultados indicam que a variabilidade climática em Moçambique não apenas é uma realidade mensurável, mas também uma ameaça concreta à estabilidade dos sistemas agrícolas, ecológicos e socioeconômicos do país.

Neste contexto, torna-se imperativo o desenvolvimento e a implementação de estratégias de adaptação climática baseadas em evidências científicas, como o uso de cultivares tolerantes ao estresse hídrico, sistemas de irrigação mais eficientes, conservação do solo e captação de águas pluviais. Além disso, a integração de dados climáticos geoespaciais de alta resolução em sistemas de alerta precoce e planejamento agrícola deve ser ampliada, a fim de fortalecer a resiliência local frente à intensificação das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- BEEKMAN, W.; VELDWISCH, G. J. Supporting farmer-led irrigation in Mozambique. **Sustainability**, [s. l.], v. 8, n. 6, 2016. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/386731>
- BENTO, C.; CARDOSO, P.; BEILFUSS, R. D.; CHIMIMBA, C. T. Zoogeographic regionalisation of terrestrial vertebrates of Mozambique. **African Journal of Ecology**, [s. l.], v. 62, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.1111/aje.13248>
- CHICHANGO, F.; CRISTOVAO, L.; GRANDE, S. Solar dryer technologies for agricultural products in Mozambique: An overview. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. e6812439850, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.39850>.
- DOS MUCHANGOS, A. Moçambique: paisagens e regiões naturais. Maputo, 1999.
- FERRIER, H.; RUPPEL, O. C. Country report for Mozambique. In: Ruppel, O. C.; Ginzky, H.; Murray, R. (Orgs.). **Legal Pathways to Sustainable Soil Management in Africa**. Baden-Baden: Nomos, 2025. p. 393-466. Disponível em: <https://doi.org/10.5771/9783748951230-393>.
- FLANAGAN, P. X. Precipitation and temperature maxima: A study across the Southern Great Plains winter wheat region. **Earth Interactions**, [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.1175/ei-d-23-0019.1>
- HOGUANE, A. Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique. [s. l.], v. 7, n. 1, p. 69–82, 2007. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rgci/rgci11.html> DOI: 10.5894/rgci11
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE). **Anuário Estatístico 2019 Moçambique**. Instituto Nacional de Estatística, Maputo, 2020.
- JAYA, I. G. N. M. et al. A relationship between temperature and precipitation over the contiguous Bandung city, Indonesia. **Communications in Mathematical Biology and Neuroscience**, [S.l.], n. 2020:63, 2020.
- MANHIQUE, A.; REASON, C.; BARIMALALA, R. Rainfall onset and cessation over Mozambique and relationship with sea surface temperature and atmospheric patterns. **International Journal of Climatology**, [s. l.], 2023. <https://doi.org/10.1002/joc.8120>
- TIWARI, S.; KASHYAP, P. S.; TAMANG, S. K.; IMMANUEL, J. Climate Trends and Future Projections: Analyzing Temperature and Precipitation Patterns in the Guwahati Region. [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4070094/v1>