

Impactos do La Niña de 2022 na produtividade do dendê na Amazônia: análise agrometeorológica e implicações para a sustentabilidade

Manuel António Henriques dos Reis Lopes¹

¹ Doutoramento em Agronegócio na Universidade de Évora e Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal

Histórico do Artigo: Submetido em: 22/05/2025 – Revisado em: 11/12/2025 – Aceito em: 29/01/2026

RESUMO

Este artigo analisa os impactos das alterações climáticas sobre a cultura do dendê (*Elaeis guineensis*) na região de Belém, Pará, influenciadas pela atuação do fenômeno La Niña com base em dados agrometeorológicos da estação da Embrapa Amazônia Oriental referentes ao ano de 2022, comparados à média climatológica de 1967 a 2021. Embora o foco seja a cidade de Belém, os dados analisados são considerados representativos das condições edafoclimáticas predominantes em áreas produtoras da Amazônia úmida, permitindo inferências aplicáveis a outras regiões de cultivo do dendê. O estudo adota uma abordagem exploratória-descritiva, utilizando o método de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração de referência e o balanço hídrico, além de avaliar variáveis críticas como temperatura, precipitação, radiação solar, umidade relativa e vento. Os resultados revelam que, embora a temperatura média anual (26,7 °C), a umidade relativa (85%) e os níveis de insolação tenham se mantido dentro das faixas ideais para a cultura, foram observadas anomalias relevantes, como déficits hídricos em meses estratégicos e menor radiação solar no primeiro quadrimestre, afetando a fotossíntese e o enchimento dos frutos. A produtividade estimada foi de 20,2 t/ha de cachos frescos (CFF), 4,4 t/ha de óleo de palma e 0,5 t/ha de óleo de palmiste (kernel), equivalente a aproximadamente 80% do potencial ideal. Em comparação com outros países produtores (Colômbia, Malásia e Indonésia), o Brasil demonstrou resiliência produtiva. O estudo conclui que, com manejo adequado, o cultivo do dendê na Amazônia é técnica e economicamente viável mesmo sob condições climáticas desafiadoras.

Palavras-chave La Niña ; Dendê (*Elaeis guineensis*); Agrometeorologia; Evapotranspiração; Sustentabilidade agrícola

Impacts of the 2022 La Niña on oil palm productivity in the Amazon: agrometeorological analysis and sustainability implications

ABSTRACT

This article analyzes the impacts of climate change on oil palm (*Elaeis guineensis*) crops in the region of Belém, Pará, influenced by the performance of the La Niña phenomenon based on agrometeorological data from the Embrapa Eastern Amazon station for the year 2022, compared to the climatological average from 1967 to 2021. Although the focus is on the city of Belém, the data analyzed are considered representative of the edaphoclimatic conditions prevailing in producing areas of the humid Amazon, allowing inferences applicable to other regions of oil palm cultivation. The study adopts an exploratory-descriptive approach using the Penman-Monteith method to estimate reference evapotranspiration and water balance, and analyzes key variables such as temperature, precipitation, solar radiation, relative humidity, and wind. Results show that while the annual average temperature (26.7 °C), relative humidity (85%), and sunshine levels remained within ideal ranges, significant anomalies were observed, such as water deficits in key months and lower solar radiation in the first quarter, affecting photosynthesis and fruit filling. The estimated productivity was 20.2 t/ha of fresh fruit bunches (FFB), 4.4 t/ha of palm oil, and 0.5 t/ha of palm kernel oil, equivalent to approximately 80% of the ideal potential. Compared to other producing countries (Colombia, Malaysia, and Indonesia), Brazil demonstrated climatic resilience in productivity. The study concludes that, with proper management, oil palm cultivation in the Amazon remains technically and economically viable even under challenging climate conditions.

Keywords: La Niña; Oil palm (*Elaeis guineensis*); Agrometeorology; Evapotranspiration; Agricultural sustainability

Impactos de La Niña 2022 en la productividad de la palma aceitera en la Amazonía: análisis agrometeorológico y implicaciones para la sostenibilidad

RESUMEN

Este artículo analiza los impactos del cambio climático en los cultivos de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en la región de Belém, Pará, influenciados por el comportamiento del fenómeno de La Niña a partir de datos agrometeorológicos de la estación Embrapa Amazonía Oriental para el año 2022, en comparación con el promedio climatológico de 1967 a 2021. Si bien el foco está puesto en la ciudad de Belém, los datos analizados se consideran representativos de las condiciones edafoclimáticas prevalecientes en las zonas productoras de la Amazonía húmeda, permitiendo inferencias aplicables a otras regiones del cultivo de palma aceitera. El estudio adopta un enfoque exploratorio-descriptivo, utilizando el método de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia y el balance hídrico, y evalúa variables críticas como temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa y viento. Los resultados muestran que, si bien la temperatura media anual (26,7 °C), la humedad relativa (85%) y los niveles de insolación se mantuvieron dentro de los rangos ideales, se observaron anomalías relevantes, como déficits hídricos en meses clave y menor radiación solar en el primer trimestre, afectando la fotosíntesis y el desarrollo de los frutos. La productividad estimada fue de 20,2 t/ha de racimos frescos (RFF), 4,4 t/ha de aceite de palma y 0,5 t/ha de aceite de palmiste (kernel), equivalente a aproximadamente el 80% del potencial ideal. En comparación con otros países productores (Colombia, Malasia e Indonesia), Brasil mostró resiliencia productiva. El estudio concluye que, con una gestión adecuada, el cultivo de palma aceitera en la Amazonía sigue siendo técnica y económicamente viable incluso bajo condiciones climáticas desafiantes.

Palabras clave: La Niña; Palma aceitera (*Elaeis guineensis*); Agrometeorología; Evapotranspiración; Sostenibilidad agrícola

1. Introdução

A expansão do cultivo de óleo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.), conhecido popularmente como dendê, representa um dos principais vetores do desenvolvimento agrícola em regiões tropicais. A plantação de dendezeiros está associada a diversos benefícios econômicos, como a geração de empregos, a inclusão produtiva de pequenas propriedades e o potencial de substituição de óleos vegetais de menor produtividade. No entanto, a produção de óleo de palma depende fortemente de condições climáticas adequadas, sendo considerada uma cultura altamente sensível a variações ambientais. Seu desempenho agronômico está diretamente ligado a fatores como temperatura, precipitação, radiação solar e umidade relativa do ar, os quais influenciam os níveis de fotossíntese, evapotranspiração e o balanço hídrico da planta.

A expansão do cultivo de óleo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.), conhecido popularmente como dendê, representa um dos principais vetores do desenvolvimento agrícola em regiões tropicais, especialmente em países em desenvolvimento, devido à sua elevada produtividade por unidade de área e ampla aplicabilidade industrial (Corley & Tinker, 2016; FAO, 2022). A plantação de dendezeiros está associada a diversos benefícios econômicos, como a geração de empregos, a inclusão produtiva de pequenas propriedades e o potencial de substituição de óleos vegetais de menor rendimento, contribuindo para a segurança alimentar e energética (Woittiez et al., 2017; Pirker et al., 2016). No entanto, a produção de óleo de palma depende fortemente de condições climáticas adequadas, sendo considerada uma cultura altamente sensível a variações ambientais. Seu desempenho agronômico está diretamente relacionado a fatores como temperatura, precipitação, radiação solar e umidade relativa do ar, os quais influenciam os processos fisiológicos da planta, incluindo a fotossíntese, a evapotranspiração e o balanço hídrico (Corley, 2009; Carr, 2011; Paterson et al., 2015).

A Amazônia brasileira apresenta características naturais consideradas ideais para o cultivo do dendezeiro, com temperaturas médias elevadas, alta umidade e regime pluviométrico expressivo. Estudos indicam que a faixa térmica ideal para o crescimento da cultura situa-se entre 24 °C e 28 °C, com precipitação entre 1.800 e 2.500 mm/ano bem distribuída (Silalertruksa & Kawasaki, 2015; Paterson et al., 2017). A radiação solar mínima requerida gira em torno de 18 MJ/m²/dia e exige-se pelo menos seis horas diárias de brilho solar (ISA, M. S et.al 2016).; A umidade relativa ideal varia entre 75% e 85%, e o equilíbrio entre evapotranspiração e precipitação é essencial para evitar o estresse hídrico (Corley & Tinker, 2016). Dados da Embrapa Amazônia Oriental (2022) mostram que, no ano analisado, as temperaturas máximas mensais aumentaram até 4% em relação à média histórica (1967–2021), com déficits hídricos relevantes em julho (81,6%) e setembro (63,8%). Essas mudanças impactam diretamente os processos fisiológicos da planta, como a fotossíntese, e refletem a influência crescente das mudanças climáticas regionais.

Nos últimos anos, as alterações climáticas vêm modificando os padrões agrometeorológicos da

Amazônia, impondo desafios significativos à sustentabilidade do cultivo do dendê. Fenômenos como secas prolongadas, chuvas intensas, elevação da temperatura e alterações na sazonalidade têm sido registrados com maior frequência no Norte do Brasil, especialmente no Pará, estado que concentra a maior parte da produção nacional.

Em 2022, a atuação do fenômeno La Niña contribuiu para intensificar esses extremos, promovendo anomalias térmicas, redução da insolação e maior irregularidade no regime de chuvas. Dados da Embrapa (2022) indicam aumento de até 4% na temperatura média mensal em comparação com a normal climatológica de 1967 a 2021, refletindo os efeitos combinados do aquecimento global e da influência do La Niña na dinâmica atmosférica regional. No mesmo período, a precipitação acumulada apresentou oscilações relevantes, com déficits superiores a 60% da média histórica em meses como julho e setembro. Tais variações afetam o desenvolvimento fenológico da planta e contribuem para a queda da produtividade.

Além das variações climáticas, o cultivo do dendê requer condições edafoclimáticas específicas que restringem sua expansão. Os solos da Amazônia, em geral Latossolos Amarelos e Vermelhos, são profundos e bem drenados, mas apresentam baixa fertilidade natural e exigem calagem, adubação e manejo conservacionista para atender às demandas nutricionais da cultura (Embrapa, 2010; Vieira, 1988). O uso de material genético adaptado e resistente a pragas e doenças é outro fator determinante para garantir a resiliência produtiva (SIPAM, 2010). Em outras regiões do mundo, o avanço da cultura do óleo de palma encontra desafios distintos. No Sudeste Asiático, onde o cultivo é predominante, surgem preocupações ambientais e pressões por regulação frente ao desmatamento e às emissões de gases de efeito estufa (Lee et al., 2021).

Na Indonésia e na Malásia, a necessidade de conciliar crescimento econômico com preservação ambiental tem levado à adoção de certificações e a restrições legais para minimizar impactos sobre a biodiversidade (Seghezzo et al., 2011; Pirker et al., 2016). Na América Latina, a expansão ocorre sob uma lógica que busca equilíbrio entre desenvolvimento econômico, conservação ambiental e inclusão social, mas ainda enfrenta obstáculos como variabilidade climática e carência de planejamento territorial (Malaysian Palm Oil Council, 2012). Países como Brasil, Colômbia e Equador têm elevado potencial para crescer no mercado global de óleo de palma, mas encontram entraves relacionados à estrutura fundiária, limitações logísticas e dificuldade na adoção de certificações socioambientais (Jones et al., 2019; Smith et al., 2020).

Na África Ocidental, berço da espécie, os obstáculos são de outra natureza: baixa produtividade, infraestrutura deficiente e ausência de políticas consistentes de fomento (Corley & Tinker, 2016). Países como Nigéria e Gana, embora tradicionais na produção do óleo de palma, ainda operam com baixos níveis de tecnificação e enfrentam dificuldades para modernizar seus sistemas produtivos (Woittiez et al., 2017). A produtividade média nos sistemas africanos permanece inferior à observada nas plantações comerciais do Sudeste asiático, reflexo da falta de investimentos em genética e mecanização (Brown et al., 2018; Paterson et al., 2013). Na cidade de Belém (PA), um polo representativo da produção de dendê, os dados de 2022 mostram compatibilidade com as exigências fisiológicas da cultura, embora com alertas. A temperatura média anual foi de 27,2 °C, dentro da faixa ideal, e a precipitação ultrapassou os 2.800 mm, com boa distribuição anual. A radiação solar variou entre 19 e 21 MJ/m²/dia, apoiando o processo fotossintético. A insolação total superou 2.300 horas, e a umidade relativa oscilou entre 80% e 90%, o que é compatível com as exigências fisiológicas da planta. No entanto, déficits hídricos localizados e evapotranspiração elevada (1.730 mm/ano) indicam riscos de estresse hídrico durante fases críticas do desenvolvimento fenológico, reforçando a necessidade de manejo eficiente da água.

Embora o presente estudo tenha como foco empírico os dados de Belém, sua similaridade climática com outras áreas de produção do Pará (como Moju, Acará, Tailândia, Tomé-Açu e Mãe do Rio) justifica a extração das análises. Segundo Venturieri et al. (2023), a área cultivada com dendê na Amazônia brasileira gira em torno de 223 mil hectares. Comparações com dados internacionais indicam que a produtividade média do Brasil em 2022, estimada em 4,4 t/ha de óleo de palma, supera as médias observadas na Indonésia (3,0 t/ha) e na Malásia (3,2 t/ha), e Colômbia (entre 3,3 e 3,5 t/ha). Apesar dos bons resultados, o rendimento potencial ideal da cultura pode alcançar entre 4,5 e 5,0 t/ha/ano, o que revela uma margem significativa para avanços técnicos, melhorias no manejo agronômico e ganhos de eficiência nas condições amazônicas.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar os impactos das mudanças climáticas sobre a cultura do dendê (*Elaeis guineensis*) nas principais áreas produtoras do estado do Pará, com base em dados agrometeorológicos da Embrapa referentes ao ano de 2022 e na climatologia histórica do período de 1967 a 2021. A análise busca identificar variáveis climáticas críticas e avaliar sua relação com a produtividade da

cultura, considerando fatores como temperatura do ar, precipitação, radiação solar, insolação, umidade relativa, balanço hídrico e evapotranspiração, à luz das exigências fisiológicas do dendezeiro.

De acordo com a FAO (2022) e o IPCC (2021), os sistemas agrícolas tropicais apresentam elevada vulnerabilidade às mudanças climáticas, o que reforça a necessidade de abordagens integradas que articulem conhecimento científico, planejamento agroclimático e estratégias de adaptação. Nesse contexto, a ocorrência do fenômeno La Niña em 2022, predominante durante grande parte do ano, influenciou a distribuição intra-anual da precipitação e a disponibilidade de radiação solar, contribuindo para desequilíbrios hídricos sazonais e alterações no padrão fotossintético da cultura (Marengo et al., 2018; INMET, 2023).

Ainda assim, a produtividade observada manteve-se próxima aos níveis de referência, evidenciando a capacidade de adaptação dos sistemas produtivos regionais às condições climáticas adversas. Os resultados obtidos reforçam a importância do zoneamento agroclimático, da adoção de tecnologias sustentáveis e do aprimoramento das práticas de manejo agrícola como instrumentos fundamentais para a mitigação de riscos climáticos e para a sustentabilidade da dendicultura na Amazônia (Oliveira et al., 2020).

2. Referencial Teórico

2.1 Aspectos Gerais do Clima e do Clima da Amazônia

O clima desempenha um papel central em todos os processos naturais, sendo um dos principais determinantes das atividades humanas, sobretudo na agricultura. A variabilidade dos elementos meteorológicos, como temperatura, precipitação, radiação solar e umidade relativa, condiciona o desempenho das culturas, influenciando o crescimento, a produtividade e a qualidade dos produtos agrícolas. No caso de culturas tropicais como o dendezeiro (*Elaeis guineensis*), essas condições tornam-se ainda mais relevantes, pois pequenas alterações nos parâmetros climáticos podem gerar grandes impactos nos processos fisiológicos da planta.

Segundo a Embrapa (2023), compreender a dinâmica climática é fundamental para o planejamento agrícola, permitindo a formulação de calendários agrícolas regionais e a adoção de tecnologias adequadas ao contexto ambiental. Essas informações também embasam a elaboração de políticas públicas, como o zoneamento agroclimático e programas de mitigação de riscos climáticos. Conforme Nilsa et al. (2023), a agricultura tropical deve ser acompanhada de ferramentas de monitoramento meteorológico em tempo real, especialmente em regiões como a Amazônia, que apresentam elevada heterogeneidade microclimática.

A Amazônia apresenta um clima singular, marcado por altas temperaturas, elevada umidade relativa e chuvas abundantes durante praticamente todo o ano. Conforme a classificação climática de Köppen (2013), a região pertence majoritariamente aos tipos Af (floresta tropical) e Am (monçônico), caracterizados por chuvas superiores a 2.000 mm anuais e temperaturas médias acima de 25 °C.

Estudos de Rocha et al. (2017), Fisch et al. (1998), Marengo (2019) e Nobre et al. (2009) confirmam que o clima amazônico é controlado por vários sistemas atmosféricos, entre eles a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que promove precipitações intensas ao longo do equador. Outros sistemas importantes incluem as Linhas de Instabilidade da Amazônia (LIA), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o Jato de Baixo Nível (JBN) e a Circulação de Walker, que contribuem para a formação de nebulosidade e chuvas.

A Bacia Amazônica também atua como um "reciclador" de água, sendo responsável por cerca de 50% da umidade atmosférica por meio do processo de evapotranspiração da floresta (Rocha et al., 2017). Essa característica confere à região uma estabilidade hídrica relativa, mas também a torna vulnerável às mudanças no uso da terra e ao desmatamento, que afetam esse equilíbrio.

2.2 Impactos das Alterações Climáticas (Edafoclimática) na Produção de Óleo de Palma

A produção de óleo de palma é extremamente sensível às variações climáticas. Estudos recentes apontam que alterações nos padrões de precipitação e o aumento das temperaturas estão associados à queda na produtividade e à redução da qualidade dos frutos. Eventos extremos, como secas prolongadas ou chuvas excessivas, prejudicam a fotossíntese, a polinização e a formação dos cachos, resultando em menores rendimentos (Smith et al., 2018; Jones & Brown, 2019).

Hassan et al. (2020) destacam que essas mudanças climáticas exigem respostas adaptativas rápidas, com destaque para o uso de cultivares resistentes, a adoção de práticas de manejo conservacionista e a utilização eficiente dos recursos hídricos. Sistemas de irrigação tecnificados e a integração de tecnologias digitais para previsão climática têm se mostrado eficazes na redução de perdas e no aumento da resiliência (Yusuf & Francisco, 2019; Oliveira et al., 2020).

A temperatura é uma das variáveis climáticas mais relevantes para o desenvolvimento fisiológico das plantas, em especial para espécies tropicais perenes como o dendê. A faixa ideal para o desenvolvimento do dendezeiro situa-se entre 24 °C e 28 °C. Dentro dessa margem, as atividades metabólicas da planta ocorrem de forma eficiente, favorecendo a fotossíntese, a respiração, a formação floral e o enchimento dos frutos. Contudo, elevações acima dessa faixa podem ocasionar estresse térmico, especialmente quando associadas a déficits hídricos, resultando em distúrbios fisiológicos e comprometimento do rendimento da cultura.

Estudos conduzidos pelo Ministério dos Recursos Naturais e Meio Ambiente da Malásia (2010) demonstraram que um aumento de temperatura entre 1 °C e 4 °C pode reduzir a produtividade do óleo de palma entre 10% e 40%. Sarkar et al. (2020) Estudos recentes reforçam essa preocupação, ao indicarem que aumentos de temperatura superiores a 2 °C podem provocar reduções de até 30% no rendimento dos cachos, sobretudo em áreas sem irrigação suplementar. Esse acréscimo térmico acentua a evaporação da água no solo e compromete a absorção de nutrientes essenciais como potássio e fósforo, afetando negativamente o enchimento dos frutos e a síntese de óleo (Woittiez et al., 2017; Silalertruksa & Kawasaki, 2015).

Além disso, Dumbrell e Hill (2005) e Fleiss et al. (2017) observaram que temperaturas elevadas prejudicam o florescimento e a diferenciação floral, podendo levar ao aborto de inflorescências femininas, o que compromete diretamente a produtividade por hectare. A combinação de calor excessivo e radiação intensa ainda agrava os danos por escaldadura e necrose foliar, especialmente em palmeiras jovens.

2.3 Impacto do Déficit Hídrico no Cultivo de Dendezeiros

O dendê é uma cultura altamente sensível à disponibilidade de água no solo. Embora tolere curtos períodos de seca, a ausência prolongada de umidade pode afetar severamente a produtividade, sobretudo em fases críticas como o florescimento, a fecundação e o enchimento dos frutos. A faixa pluviométrica ideal para a cultura é entre 1.800 e 2.500 mm ao ano, bem distribuídos. El-Gafy (2017) identificou que déficits hídricos superiores a 150 mm em períodos contínuos reduzem em até 30% a produção anual de óleo por hectare.

A falta de água também aumenta a incidência de doenças como a podridão da raiz (*Ganoderma spp.*), por comprometer a capacidade imunológica da planta. Além disso, o estresse hídrico crônico reduz o teor de óleo por fruto e a eficiência da extração (Silalertruksa & Kawasaki, 2015). A carência hídrica também compromete a atividade estomática, prejudicando a troca gasosa e, consequentemente, a eficiência fotossintética. Jaroenkietkajorn e Gheewala (2020) ressaltam que o estresse hídrico prolongado influencia negativamente o desenvolvimento dos cachos e a taxa de frutificação, tornando a produção instável e economicamente inviável em áreas não irrigadas.

Eventos de excesso hídrico, por sua vez, também causam prejuízos significativos à cultura do dendê. Inundações afetam a aeração do solo, limitando a respiração radicular, o que resulta na morte de raízes ativas e na redução da absorção de água e nutrientes. Henson et al. (2008) destacam que inundações prolongadas em áreas de baixa drenagem comprometem a sobrevivência de palmeiras jovens e reduzem a produtividade de plantas adultas.

Na Malásia, o histórico de 1926 revelou perdas de milhares de hectares de dendezeiros devido a enchentes (Koon & Kun, 2006). Mais recentemente, Hooijer et al. (2015) demonstra que cerca de 15% a 20% da área cultivada com palma no Sarawak sofre declínio de rendimento devido à drenagem deficiente. Com a intensificação das mudanças climáticas, estima-se que até 42% das áreas de produção possam estar em risco devido à elevação do nível dos lençóis freáticos. Além dos impactos diretos, as inundações afetam a logística, o transporte e o processamento dos frutos, ampliando as perdas pós-colheita e aumentando os custos operacionais.

A radiação solar é um dos fatores mais determinantes para a fotossíntese e, consequentemente, para a produtividade do dendê. A faixa ideal situa-se entre 18 e 24 MJ/m²/dia. Níveis inferiores a esse intervalo comprometem a taxa fotossintética líquida, o que afeta o acúmulo de biomassa e o desenvolvimento dos cachos.

Silalertruksa e Kawasaki (2015) observaram que, em regiões com baixa insolação ou alto índice de nebulosidade, a produção de óleo por hectare pode cair até 20%. Além disso, o baixo brilho solar reduz a fecundação das flores femininas, pois compromete o sincronismo de florescimento entre os sexos. Gawankar et al. (2021) também associaram a deficiência de radiação solar à maior incidência de abortamento floral e frutos mal formados. Por outro lado, a exposição prolongada a radiação elevada, sobretudo acima de 30 MJ/m²/dia, pode causar danos ao tecido foliar, provocando necrose e escaldadura, especialmente em mudas e palmeiras jovens. Esse estresse térmico e luminoso reduz a área foliar ativa e a eficiência de uso da luz.

O vento é outro elemento climático que pode atuar como agente positivo ou negativo no cultivo do dendê. Em níveis moderados (1 a 3 m/s), favorece a polinização natural e a renovação da camada de ar próximo às folhas, aumentando a taxa de transpiração e, portanto, a absorção de nutrientes. No entanto, ventos intensos (>5 m/s) causam danos estruturais, como quebra de folhas, hastes e até inflorescências.

Jaroenkietkajorn & Gheewala (2020) destacam que ventos fortes reduzem a área foliar efetiva e comprometem a sustentação de cachos, afetando diretamente o rendimento. Silalertruksa & Kawasaki (2015) também relatam que rajadas intensas durante o florescimento prejudicam a eficiência da polinização, levando à formação de cachos incompletos ou estéreis. Além disso, o vento contribui para a dispersão de doenças e pragas, como o ácaro vermelho e o Rhynchophorus palmarum, vetor do fungo Fusarium oxysporum. Em áreas sem quebra-ventos naturais ou artificiais, os impactos podem ser severos, com perdas de até 25% na produção anual.

A evapotranspiração é a principal via de saída de água do sistema solo-planta-atmosfera e atua como regulador térmico e fisiológico da cultura. A estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀), por meio da equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), permite avaliar a demanda hídrica da planta e planejar o manejo da irrigação e drenagem.

Segundo a FAO (2021), a evapotranspiração ideal para o dendê varia de 3,5 a 5,5 mm/dia. Valores acima desse intervalo indicam alta demanda evaporativa, aumentando o risco de estresse hídrico em solos com baixa retenção de água. Fereres & Soriano (2007) e Naranjo et al. (2019) demonstraram que o controle eficiente da ET₀, por meio de irrigação localizada e sombreamento planejado, pode elevar a eficiência hídrica e a produtividade em até 20%. A Amazônia apresenta alta variabilidade na evapotranspiração diária, com períodos críticos durante os meses de maior radiação (agosto a outubro). Nesses meses, o balanço hídrico frequentemente se torna negativo, exigindo estratégias adaptativas como irrigação suplementar, cobertura morta e espaçamento adequado entre plantas.

2.4 Solos da Amazônia e seus impactos

A análise dos cerca de 223.000 hectares atualmente ocupados pelo cultivo do dendêzeiro na região amazônica requer um entendimento aprofundado da pedologia local. Estudos da Embrapa indicam que os principais solos da região pertencem aos grupos dos Latossolos Amarelos e Vermelhos, caracterizados por seu alto grau de intemperismo, elevada lixiviação e baixa fertilidade natural (Embrapa, 2010; Santos et al., 2006). Tais solos apresentam textura variando de média a argilosa, estrutura granular estável e boa drenagem, atributos físicos que favorecem o enraizamento profundo e o desenvolvimento da cultura da palma de óleo (Vieira, 1988).

Apesar das limitações químicas (como acidez elevada, baixa capacidade de troca de cátions e deficiência de nutrientes essenciais) esses solos podem ser manejados adequadamente para garantir elevada produtividade. Práticas como calagem, adubação mineral balanceada e o uso de estratégias conservacionistas de manejo do solo são fundamentais para superar tais desafios (Bos et al., 2020). Dessa forma, torna-se possível conciliar a produção agrícola com a conservação dos recursos naturais, contribuindo para a sustentabilidade do sistema produtivo de dendêzeiros na Amazônia, (Oliveira et al., 2020; Embrapa, 2023)

A qualidade do solo é um fator determinante para a produtividade agrícola e pode ser avaliada por meio de indicadores biofísicos, entre os quais se destaca a produção biótica. Essa abordagem utiliza a Produção Primária Líquida (PPL) como parâmetro para estimar a capacidade do solo de sustentar processos ecológicos e agronômicos, incluindo a reciclagem de carbono, o fornecimento de nutrientes e o suporte ao crescimento vegetal. A diferença entre a PPL potencial (estimada em condições ideais) e a PPL real (observada em campo) representa um importante indicativo da degradação do solo, sendo útil para identificar áreas com comprometimento funcional (Bos et al., 2020; Legaz et al., 2016; Kaenchan et al., 2018).

A degradação da qualidade do solo, quando associada ao cultivo intensivo de dendzeiros sem manejo adequado, pode levar à redução da fertilidade, perda de matéria orgânica, compactação e erosão, além de alterar a microbiota do solo. Esses efeitos comprometem os serviços ecossistêmicos do solo e impactam diretamente a produtividade e a sustentabilidade da cultura.

No contexto da sustentabilidade territorial e do uso eficiente da terra, este estudo também propõe critérios para a identificação de áreas mais adequadas à expansão futura da cultura do dendê, considerando a minimização dos impactos ambientais associados. Para isso, foram integrados quatro indicadores principais de impacto sobre o uso da terra: (i) degradação do solo; (ii) alterações no estoque de carbono; (iii) perda de biodiversidade; e (iv) alteração da cobertura vegetal nativa.

Para permitir a comparação e combinação dos diferentes indicadores, que apresentam unidades distintas, foi empregada uma técnica de normalização interna, convertendo os valores de cada indicador em uma escala de 0 a 1, onde 0 representa a condição mais degradada e 1 a condição ideal. A pontuação final agregada fornece um índice sintético de sustentabilidade do uso do solo, facilitando a tomada de decisão sobre a expansão da cultura. O cálculo dos escores normalizados seguiu os procedimentos descritos por Silalertruksa e Kawasaki (2015), El-Gafy (2017), e Jaroenkitkajorn e Gheewala (2020), sendo possível identificar zonas prioritárias para manejo conservacionista e expansão agrícola responsável.

2.4.1 Cálculo do Estoque de Carbono do Solo (CSOC)

A mensuração do estoque de carbono no solo (CSOC – Carbon Soil Organic Content) fornece base quantitativa para avaliar o potencial de sequestro de carbono de áreas agrícolas e florestais. A equação empregada neste estudo segue a proposta metodológica de Silalertruksa e Kawasaki (2015), considerando variáveis edáficas, físicas e de manejo, conforme expresso na fórmula:

$$\text{CSOC} = \Sigma [(A \times Di \times Bdi \times Ci) \times FLU \times FMG \times FI] \quad (1)$$

Onde: CSOC: Estoque de carbono orgânico no solo (Mg C ha^{-1}) Σ : Soma das camadas consideradas (ex: 0–10 cm, 10–20 cm, etc.) A: Área de referência (ha) — geralmente 1 ha para simplificar Di: Espessura da camada de solo i (cm) Bdi: Densidade do solo na camada i (g cm^{-3}) Ci: Teor de carbono orgânico na camada i (%) ou (g C g^{-1} solo) FLU: Fator de uso da terra — ajusta o valor segundo o tipo de uso (ex: floresta, pasto, agricultura) FMG: Fator de manejo da terra — considera práticas agrícolas (ex: adubação verde, revolvimento do solo, cobertura) FI: Fator de entrada de insumos — avalia a reposição de biomassa/orgânicos

Esta fórmula permite estimar com maior precisão o estoque de carbono em sistemas agrícolas, florestais ou em restauração ecológica, sendo uma ferramenta útil para estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), projetos de REDD+ e práticas de agricultura sustentável e impacto do clima na produção (adaptado de IPCC, 2006; Lal, 2004).

2.5 Topografia e Material vegetal

A área de estudo caracteriza-se por relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, com presença de uma rede hidrográfica bem distribuída, elementos que favorecem significativamente a mecanização agrícola, o escoamento natural das águas e a implantação de sistemas produtivos com menores exigências em movimentação de terra. Essas condições topográficas são especialmente relevantes para a cultura do dendê (*Elaeis guineensis*), que demanda terrenos com baixa suscetibilidade à erosão, boa drenabilidade e uniformidade para otimização das operações agrícolas (SIVAM 2002; SIPAM, 2010).

Além disso, o relevo e sua interação com os solos e o regime hídrico local contribuem diretamente para o planejamento edafoclimático e a viabilidade de cultivos perenes sustentáveis. Tais parâmetros foram originalmente definidos nas pesquisas de zoneamento conduzidas por Reis Lopes M. no âmbito da SOCFINCO na década de 1970, e posteriormente aprimorados em estudos do SIVAM (2002) e da Embrapa (2010), sendo referência até os dias atuais na seleção de áreas aptas para o cultivo sustentável do dendê na Amazônia.

A integração entre fatores topográficos, edáficos, hidrológicos e econômicos constitui uma base fundamental da análise agroecológica voltada ao cultivo do dendê em larga escala. Essa abordagem integrada permite o delineamento de projetos com maior eficiência produtiva, menor vulnerabilidade ambiental e melhor uso dos recursos naturais disponíveis, especialmente em regiões tropicais úmidas como a Amazônia.

A escolha do material genético constitui um dos principais determinantes da produtividade e sustentabilidade da cultura do dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.), sobretudo em regiões tropicais úmidas como a Amazônia. A utilização de genótipos adaptados às condições edafoclimáticas locais impacta diretamente o desempenho agronômico da planta, influenciando o vigor vegetativo, a precocidade da frutificação, a resistência a doenças, a eficiência fisiológica e a estabilidade produtiva ao longo do tempo (Corley & Tinker, 2016; Woittiez et al., 2017).

Entre os híbridos mais recomendados para a região amazônica destacam-se as combinações Deli × La Mé e Compacta × Gana, que apresentam características agronômicas associadas à elevada produtividade, arquitetura de copa compacta, maior eficiência operacional no manejo e na colheita, bem como resistência a estresses bióticos e abióticos (SIPAM, 2010; Embrapa, 2010).

O híbrido Deli × La Mé resulta da combinação de linhagens originárias da Malásia com materiais africanos de elevada produtividade e adaptabilidade, apresentando desempenho consistente em solos ácidos e de baixa fertilidade. Por sua vez, o híbrido Compacta × Gana tem sido amplamente utilizado por empresas agroindustriais, em função de sua elevada eficiência na conversão de cachos de frutos frescos (CFF) em óleo e de sua estabilidade fenotípica em ambientes sujeitos a variações climáticas sazonais (FAO, 2023).

Esses materiais genéticos são resultado de programas de melhoramento conduzidos por instituições públicas e privadas com o objetivo de ampliar a base genética da cultura e garantir sua resiliência frente às mudanças climáticas, doenças emergentes e exigências de mercado. Além disso, apresentam tolerância moderada à podridão basal do estipe, uma das principais doenças que afetam o dendezeiro em sistemas tropicais (Paterson et al., 2017). A adoção de cultivares melhoradas permite reduzir a aplicação de defensivos, aumentar a eficiência do uso de recursos naturais e melhorar os indicadores de sustentabilidade ambiental e econômica da produção (Silalertruksa & Kawasaki, 2015).

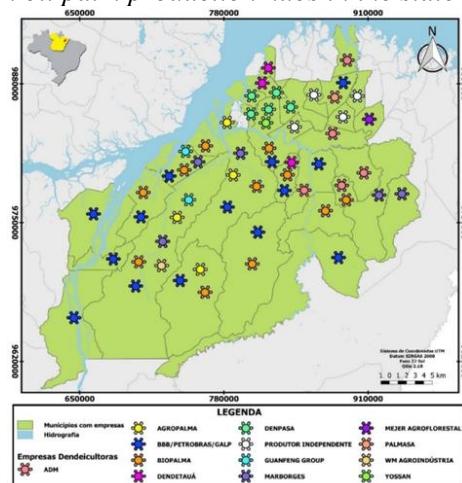
Portanto, a escolha criteriosa do material genético, associada a um zoneamento agroclimático adequado e a boas práticas de manejo, é fundamental para maximizar a produtividade e a longevidade dos cultivos. A continuidade de pesquisas com híbridos adaptados e a manutenção de bancos de germoplasma regionais são estratégias indispensáveis para a perenização da cadeia produtiva do dendê na Amazônia.

2.6 Expansão do Cultivo do Dendezeiro na Amazônia e sua Base Edafoclimática

O cultivo do dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) na Amazônia tem se expandido de forma significativa nas últimas décadas, especialmente em áreas de pastagens degradadas e de uso agrícola consolidado. Estima-se que, atualmente, cerca de 223.000 hectares estejam ocupados por plantios de palma de óleo na região, sendo o Pará o principal estado produtor (Embrapa, 2010; Oliveira et al., 2020; RSPO, 2022; Venturieri et al. 2024).

A Figura 1 apresenta a distribuição geográfica dos principais municípios produtores de óleo de palma (*Elaeis guineensis*) no estado do Pará, região Norte do Brasil.

Figura 2 – Principais polos produtores de dendê no estado do Pará (Brasil)
Figure 2– Main oil palm production hubs in the state of Pará (Brazil)



Fonte | Source: Nahum, J. S., Santos, L. S. dos, & Santos, C. B. dos. (2020).. *Mercator (Fortaleza)*, 19, e19011.
Source: Nahum, J. S., Santos, L. S. dos, & Santos, C. B. dos. (2020). *Mercator (Fortaleza)*, 19, e19011.

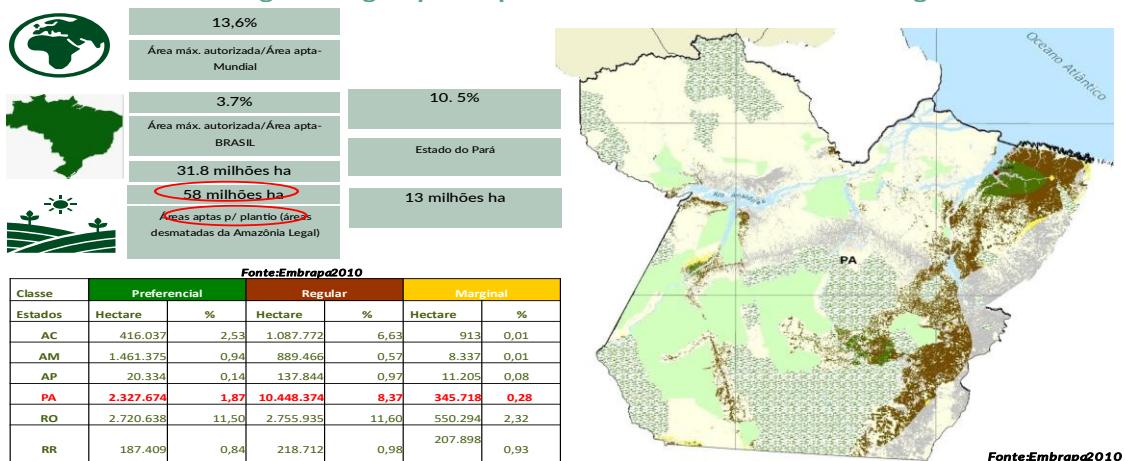
Destacam-se áreas com elevada concentração de dendicultura, notadamente nos municípios de Tailândia, Moju, Acará, Tomé-Açu, Concórdia do Pará, Abaetetuba, São Domingos do Capim e Igarapé-Miri. Esses polos concentram grandes empreendimentos agroindustriais e projetos de agricultura familiar integrados, refletindo a relevância econômica e territorial da cultura do dendê na Amazônia Oriental. A proximidade geográfica com a linha do Equador favorece condições climáticas adequadas ao cultivo, como temperaturas médias elevadas, umidade relativa elevada e regime pluviométrico regular. A figura também evidencia o padrão de ocupação do solo e a expansão da dendicultura em direção a áreas anteriormente degradadas, como estratégia de reconversão produtiva e recuperação ambiental (Nahum, J. S., Santos, L. S. dos, & Santos, C. B. dos, 2020).

Essa expansão tem como base estudos de zoneamento agroecológico que consideram a aptidão edafoclimática das áreas disponíveis, a sustentabilidade ambiental e o potencial produtivo. Segundo a Embrapa Amazônia Oriental (2010), os Latossolos Amarelos e Vermelhos são os principais solos associados à cultura do dendê na região, com características físicas favoráveis, mas exigindo correção química e manejo conservacionista devido à sua baixa fertilidade natural. A Figura 2 apresenta o zoneamento edafoclimático desenvolvido pela Embrapa,(2010) que orienta o planejamento territorial e a ocupação agrícola sustentável do território amazônico, servindo como base para decisões estratégicas quanto à localização de novos empreendimentos agroindustriais de palma de óleo.

Figura 2 – Zoneamento edafoclimático da cultura do dendêzeiro na Amazônia

Figura 2 – Edaphoclimatic zoning of oil palm cultivation in the Amazon

Zoneamento agroecológico para o plantio de dendê nos estados da região norte



3. Material e Métodos

3.1 Abordagem Agrometeorológica para a Cultura do Dendê na Amazônia

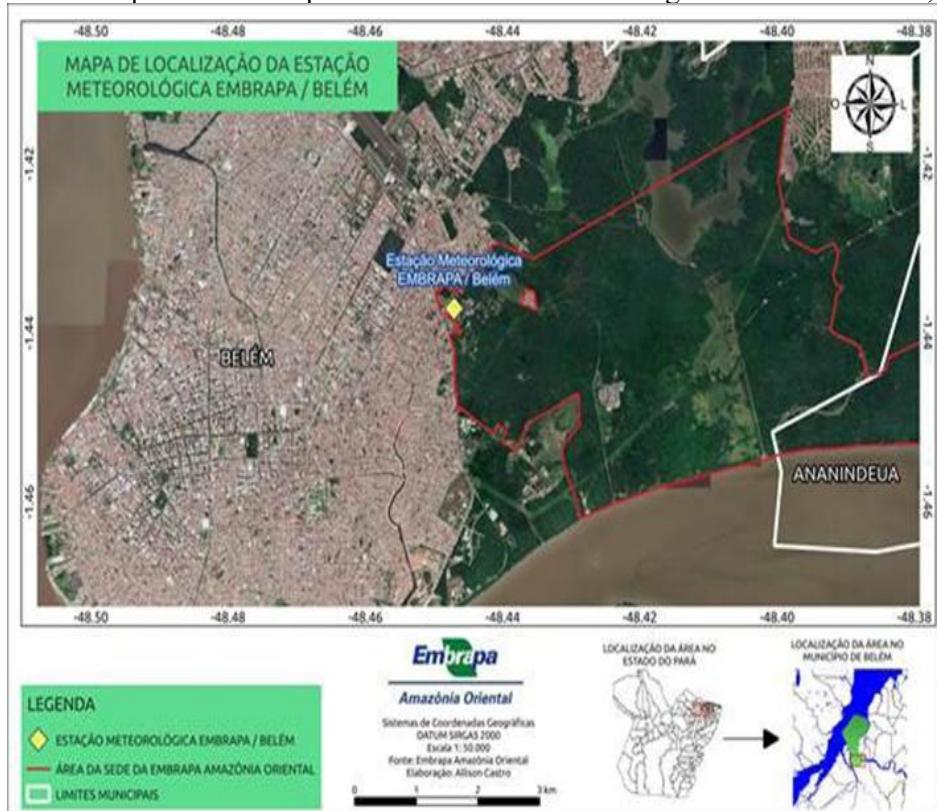
Este estudo adota uma abordagem exploratório-descritiva, baseada na análise de dados agrometeorológicos e na aplicação de métodos climatológicos voltados ao cultivo do dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) na região amazônica, com ênfase no estado do Pará. A metodologia empregada buscou correlacionar variáveis climáticas com as exigências fisiológicas da cultura, visando avaliar os impactos das alterações ambientais sobre a produtividade, com foco nas condições atmosféricas, hídricas e energéticas que condicionam o ciclo fenológico do dendêzeiro.

A área de abrangência da pesquisa inclui os principais polos de produção do Pará (Moju, Tailândia, Acará e Tomé-Açu) regiões onde se concentra a expansão agroindustrial do cultivo de palma no Brasil. Entretanto, a ausência de estações meteorológicas operacionais nas áreas de produção e a indisponibilidade de

dados técnicos por parte das empresas do setor tornaram inviável a obtenção de séries locais contínuas. Por esse motivo, utilizou-se como referência a estação agrometeorológica da Embrapa Amazônia Oriental, situada em Belém ($1^{\circ}26' S$, $48^{\circ}29' W$, altitude de 10,4 m). Essa estação oferece dados históricos confiáveis, amplamente reconhecidos por sua padronização técnica e qualidade metodológica. A Figura 3 apresenta a localização geográfica da estação meteorológica da Embrapa, situada na transição urbano-florestal da região metropolitana de Belém, adotada como principal fonte de dados climáticos deste estudo.

Figura 1 – Mapa de localização da Estação Meteorológica da Embrapa Amazônia Oriental em Belém, Pará.

Figure 1 – Location map of the Embrapa Eastern Amazon Meteorological Station in Belém, Pará.



Fonte 1: Estação agrometeorológica de superfície da Embrapa Amazônia Oriental, Belém

Source 1: Embrapa Eastern Amazon's surface agrometeorological station, Belém

Foram analisadas as seguintes variáveis climáticas: temperatura do ar (máxima, média e mínima), dentro da faixa ideal de 24°C a 28°C ; precipitação pluviométrica anual (ideal entre 1.800 a 2.500 mm); radiação solar global ($18\text{--}24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); brilho solar (mínimo de 6 horas/dia); umidade relativa (75%–85%); velocidade média do vento a 2 m; evapotranspiração de referência (ET_0), calculada pelo método de Penman-Monteith; e o balanço hídrico climatológico, estimado considerando capacidade de retenção de 100 mm no solo.

Os dados de 2022 foram comparados à média climatológica de 1967 a 2021. Aplicou-se estatística descritiva (média, desvio-padrão e amplitude relativa), com apresentação gráfica dos resultados na seção 3A. A interpretação dos resultados foi conduzida com base nas exigências ecofisiológicas do dendrozeiro, permitindo a identificação de restrições térmicas, energéticas e hídricas. Embora os dados sejam específicos de Belém, são considerados representativos da Amazônia úmida, viabilizando inferências regionalizadas. O estudo não envolveu seres humanos, animais ou informações sensíveis, em conformidade com os princípios éticos da pesquisa científica.

Por fim, foi realizada uma análise comparativa entre os dados produtivos de 2022 no Brasil e os principais países produtores mundiais (Indonésia, Malásia e Colômbia) concentraram a maior parte da produção mundial de óleo de palma, sendo responsáveis por aproximadamente 70% a 80% da oferta global, conforme apontam dados consolidados da FAO e de organizações setoriais internacionais (FAO, 2022; Woittiez et al.,

2017; GAPKI, 2022).

3.2 Metodologia Penman-Monteith

A estimativa da evapotranspiração é essencial para compreender o balanço hídrico e as exigências hídricas da cultura do dendê, especialmente em regiões tropicais como a Amazônia. Neste estudo, adotou-se o modelo de Penman-Monteith, conforme padronização da FAO (Allen et al., 1998), por ser o método de referência internacional para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0).

Esse método integra múltiplas variáveis meteorológicas (como temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento) proporcionando uma estimativa robusta da demanda atmosférica de água. Tal abordagem é especialmente relevante para culturas perenes de clima tropical úmido, como o dendê, que apresentam alta exigência hídrica ao longo de seu ciclo produtivo.

3.3 Coleta de Dados e Cálculos Complementares

Os dados meteorológicos diários de precipitação pluviométrica, temperatura do ar, umidade relativa e brilho solar foram obtidos na estação agrometeorológica da Embrapa Amazônia Oriental, localizada em Belém (latitude 01°28'S, longitude 48°27'W, altitude 12,8 m). A partir dessas informações, foram estimadas a radiação solar global e a evapotranspiração de referência (ET_0), conforme metodologias reconhecidas internacionalmente e adaptadas às condições amazônicas.

3.4 Estimativa da radiação solar global

A radiação solar global (R_g) foi estimada com base na equação empírica de Ångström-Prescott, parametrizada por Diniz et al. (1986) para a região de Belém:

$$R_g = R_o \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

Onde: - R_g : radiação solar global na superfície ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) - R_o : radiação solar extraterrestre ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)
- n: duração real de insolação (horas) - N: duração máxima de insolação (horas) - a, b: coeficientes ajustados para Belém: - Novembro a maio: a = 0,275 e b = 0,376 - Junho a outubro: a = 0,261 e b = 0,428

3.5 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0)

A evapotranspiração de referência foi estimada utilizando a equação padronizada de Penman-Monteith, conforme diretrizes do FAO-56 (Allen et al., 1998), e adaptada à ausência de algumas variáveis:

A equação base do método é:

$$ET_0 = \frac{\left(0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273} \right) \cdot u^2 \cdot (e_s - e_a) \right)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u^2)} \quad (3)$$

Onde: ET_0 = Evapotranspiração de referência (mm/dia) Δ = Declive da curva de pressão de saturação de vapor ($kPa/^{\circ}C$) R_n = Radiação líquida na superfície ($MJ/m^2/dia$) G = Fluxo de calor no solo ($MJ/m^2/dia$) γ = Constante psicométrica ($kPa/^{\circ}C$) T = Temperatura média do ar ($^{\circ}C$) u_2 = Velocidade do vento a 2 metros de altura (m/s) $e_s - e_a$ = Déficit de pressão de vapor (kPa), sendo e_s a pressão de saturação de vapor e e_a a pressão de vapor atual. Explicação da Fórmula: $0.408 \times \Delta \times (R_n - G)$: Este termo considera a radiação líquida na superfície (R_n) e o fluxo de calor no solo (G), ponderados pela Δ (declive da curva de pressão de saturação de vapor). Esse termo é importante porque a radiação líquida é a principal fonte de energia para a evaporação da água. $\gamma \times (900 / (T + 273)) \times u_2 \times (e_s - e_a)$: Este termo envolve a constante psicométrica (γ), a temperatura média do ar (T) e a velocidade do vento (u_2). Ele reflete a quantidade de vapor d'água que pode ser transferida da superfície para a atmosfera. O déficit de pressão de vapor ($e_s - e_a$) representa a diferença entre a pressão de saturação e a pressão de vapor atual, o que influencia a taxa de evaporação. $\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times u_2)$: Este termo no denominador equilibra os dois termos anteriores e ajusta a equação conforme a velocidade do vento (u_2) e a constante psicométrica (γ).

3.6 Cálculo do balanço hídrico climatológico

O balanço hídrico climatológico mensal foi estimado a partir dos dados observados de temperatura média, precipitação e evapotranspiração de referência (ET_o), conforme o método clássico proposto por Thornthwaite & Mather (1955), com implementação conforme as planilhas operacionais de Rolim et al. (1998) e ajustes metodológicos por Pereira et al. (2002). Para a simulação, considerou-se uma capacidade máxima de armazenamento de água no solo (CAD) de 100 mm, valor compatível com os tipos de solo predominantes na região amazônica. As principais variáveis utilizadas e calculadas estão na Tabela 1.

Tabela 1: Precipitação mensal e evapotranspiração de referência (ET_o) em Belém (PA) – 2022
Table 1: Monthly rainfall and reference evapotranspiration (ET_o) in Belém (PA) – 2022

Variável	Sigla	Unidade	Definição operacional
Precipitação	P	mm	Total mensal de precipitação pluviométrica observada no período de estudo.
Evapotranspiração de referência	ET_o	mm	Evapotranspiração potencial estimada pelo método FAO-56 Penman–Monteith, representando a demanda atmosférica de água.
Saldo hídrico mensal	$P - ET_o$	mm	Diferença entre a precipitação e a evapotranspiração de referência, indicando condição de excedente ou déficit hídrico.
Armazenamento de água no solo	ARM	mm	Quantidade de água armazenada no solo ao final de cada mês, limitada à capacidade máxima de armazenamento adotada (100 mm).
Deficiência hídrica	DEF	mm	Volume de água não suprido pela precipitação e pelo armazenamento no solo, indicando potencial estresse hídrico para a cultura.
Excedente hídrico	EXC	mm	Volume de água excedente não armazenado no solo nem utilizado pela planta, perdido por escoamento superficial ou percolação profunda.
Evapotranspiração real	ETR	mm	Evapotranspiração efetiva, limitada pela disponibilidade hídrica no solo.
Reposição hídrica	REP	mm	Volume de água necessário para recompor o armazenamento de água no solo após períodos de deficiência hídrica.

Fonte: Thornthwaite & Mather (1955), adaptados pelo autor

Source: Thornthwaite & Mather (1955), adapted by the author

O modelo permite observar de forma detalhada a alternância entre períodos de excedente (janeiro a maio), nos quais a precipitação supera amplamente a demanda evapotranspirativa, e períodos de deficiência hídrica (junho a outubro), caracterizados por menor pluviosidade e aumento da ET_o . Esses ciclos têm implicações diretas na disponibilidade hídrica para a cultura do dendezeiro (*Elaeis guineensis*), afetando fases fenológicas críticas como florescimento, frutificação e enchimento dos cachos.

Os resultados do balanço hídrico também evidenciam a necessidade de manejo agronômico específico para mitigar os efeitos da variabilidade sazonal, como a adoção de práticas de cobertura morta, irrigação suplementar, escolha de genótipos adaptados e conservação da estrutura do solo. Além disso, a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) foi realizada por meio da multiplicação de ET_o pelos coeficientes de cultura (K_c) específicos para as diferentes fases fenológicas do dendezeiro

A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi estimada conforme a Eq. 4

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (4)$$

Onde: ET_c : Evapotranspiração da cultura (mm/dia) K_c : Coeficiente de cultura (adimensional)
 ET_o : Evapotranspiração de referência (mm/dia)

Essa abordagem integrativa permitiu avaliar com precisão a relação entre o clima regional e a dinâmica hídrica no solo, oferecendo suporte técnico ao planejamento produtivo e à resiliência climática da cadeia da palma de óleo na Amazônia

A adoção do método de Penman-Monteith, mesmo com adaptações, garante robustez e comparabilidade internacional dos resultados, sendo reconhecido pela FAO como padrão para estudos de exigência hídrica em culturas tropicais. A integração desses cálculos aos dados fisiológicos do dendezeiro permitirá interpretar a influência das variações climáticas sobre sua produtividade ao longo do ciclo de 2022.

3.7 Metodologia de cálculo da produtividade agrícola

A estimativa da produtividade do dendezeiro foi realizada a partir da aplicação de um modelo empírico baseado em fatores de correção climáticos, que permitem representar o efeito das principais variáveis agrometeorológicas sobre a produção final. A produtividade alcançada foi calculada a partir da produtividade potencial ideal (PI), ajustada por coeficientes associados à temperatura do ar, precipitação, radiação solar, umidade relativa e evapotranspiração de referência, conforme a Equação (5).

$$\text{Produtividade alcançada (t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}\text{)} = \text{PI} \times f(T) \times f(Pp) \times f(Rg) \times f(UR) \times f(ET_0) \quad (5)$$

Os coeficientes $f(T)$, $f(Pp)$, $f(Rg)$, $f(UR)$ e $f(ET_0)$ foram atribuídos com base empírica e qualitativa, a partir da análise dos dados climatológicos observados e de valores de referência reportados na literatura técnica. Para as condições avaliadas, foi considerada uma produtividade potencial ideal de $25 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, resultando numa produtividade estimada de aproximadamente $20,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

A partir do valor estimado de cachos de frutos frescos (CFF), as produtividades específicas de óleo de palma e de óleo de palmiste foram calculadas por meio da aplicação de coeficientes médios de extração, conforme descrito a seguir: óleo de palma ($20,2 \text{ t ha}^{-1} \times 0,215$) e óleo de palmiste ($20,2 \text{ t ha}^{-1} \times 0,025$).

3.8 Procedimento de conversão da produtividade em óleo de palma e palmiste

Com base nesses valores, as produtividades específicas foram calculadas da seguinte forma: Óleo de palma: $20,2 \text{ t/ha} \times 0,215 = 4,34 \text{ t/ha/ano}$ Óleo de palmiste (kernel): $20,2 \text{ t/ha} \times 0,025 = 0,51 \text{ t/ha/ano}$

A partir da produtividade estimada de cachos de frutos frescos (CFF), procedeu-se ao cálculo das produtividades específicas de óleo de palma e de óleo de palmiste, por meio da aplicação de coeficientes médios de extração amplamente utilizados na literatura técnica e em relatórios do setor.

Para o óleo de palma, adotou-se um fator de conversão de 0,215, enquanto para o óleo de palmiste foi utilizado o coeficiente de 0,025, ambos aplicados sobre a produtividade anual estimada de CFF.

4. Resultados e Discussão

4.1 Apresentação e Interpretação dos Dados Climáticos

A avaliação climática da região de Belém, com base nos dados agrometeorológicos de 2022, possibilitou a análise detalhada de variáveis essenciais ao cultivo do dendê, incluindo temperatura do ar (máxima, média e mínima), precipitação acumulada, radiação solar global, brilho solar, umidade relativa, velocidade do vento e evapotranspiração de referência (ET₀). Esses parâmetros foram comparados com a média climatológica do período de 1967 a 2021, permitindo identificar desvios significativos, tendências e anomalias que afetam diretamente a fenologia e a produtividade do dendezeiro.

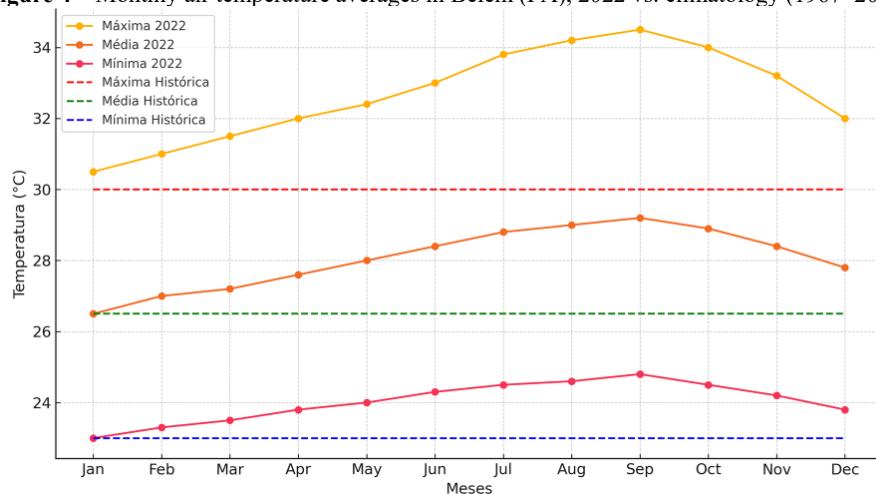
As figuras e gráficos apresentados nesta seção ilustram o comportamento mensal dessas variáveis, destacando períodos de maior risco climático, como déficits hídricos, excesso de calor ou insuficiência de radiação solar. A disposição gráfica favorece a visualização das relações entre os fatores climáticos e as fases críticas do ciclo da cultura, contribuindo para uma compreensão integrada dos impactos ambientais sobre o cultivo.

Além da caracterização climática isolada, os dados foram interpretados à luz das exigências fisiológicas da planta, como a faixa ideal de temperatura (24–28 °C), níveis adequados de precipitação (1.800 a 2.500 mm anuais), radiação solar mínima (18 MJ/m²/dia) e umidade relativa ideal (75%–85%). O cruzamento desses dados com o desempenho produtivo estimado permite fundamentar estratégias agronômicas adaptativas e subsidiar o planejamento de manejo sustentável do dendê frente às alterações climáticas.

4.1.1 Comparação das Temperaturas Médias Mensais de 2022 com a Média Climatológica (1967–2021) em Belém, PA"

A Figura 4, apresentam-se os valores das médias mensais das temperaturas máxima, média e mínima do ar observadas ao longo de 2022, em comparação com as médias climatológicas do período de 1967 a 2021, para a cidade de Belém, PA.

Figura 4 – Temperaturas médias mensais do ar em Belém (PA), 2022 vs. climatologia (1967–2021)
Figure 4 – Monthly air temperature averages in Belém (PA), 2022 vs. climatology (1967–2021)



Fonte: Dados da Embrapa (2023), adaptados pelo autor
Source: Data from Embrapa (2023), adapted by the author

Verifica-se que em todos os meses do ano de 2022 as temperaturas máximas registraram valores superiores às médias históricas, destacando-se os meses de agosto e setembro, que atingiram picos acima de 34 °C, contrastando com a média histórica em torno de 30 °C. A temperatura média de 2022 também se manteve consistentemente acima da média climatológica, indicando um possível aquecimento gradual da atmosfera regional.

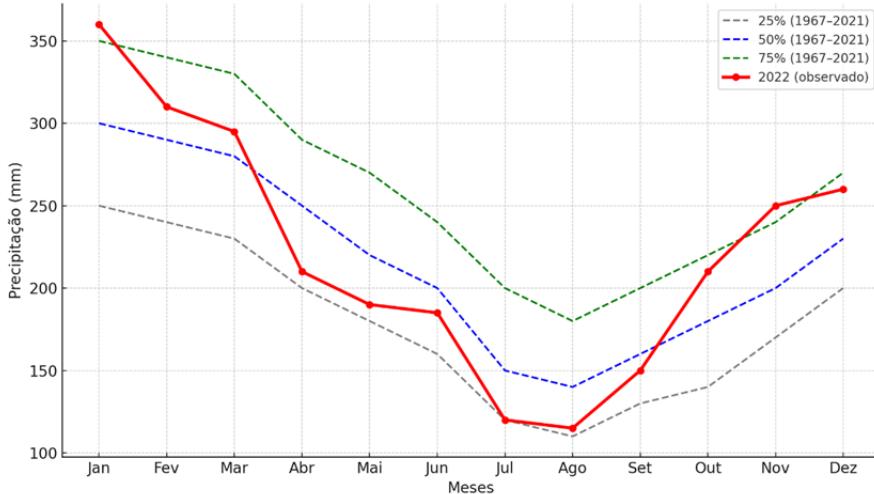
Quanto à temperatura mínima, nota-se uma elevação discreta, porém contínua, ao longo dos meses, sugerindo noites menos frias do que o padrão histórico. Esses desvios positivos em todas as faixas de temperatura reforçam a hipótese de um cenário climático em transformação, com efeitos diretos sobre os ciclos fenológicos das culturas tropicais, como o dendêzeiro, e sobre o balanço hídrico da região.

4.1.2 Análise Comparativa da Precipitação Mensal de 2022 e os Percentis Climatológicos (1967–2021) em Belém, PA

A Figura 5 apresenta a comparação entre os totais mensais de precipitação pluviométrica observados no ano de 2022 e os percentis climatológicos (25%, 50% e 75%) calculados com base na série histórica de 1967 a 2021.

Figura 5 – Precipitação mensal em Belém (PA) em 2022 vs. percentis climatológicos
Figure 5 – Monthly rainfall in Belém (PA) in 2022 vs. climatological percentiles

Figura 2. Comparação entre os totais mensais de precipitação pluviométrica em 2022 e os percentis climatológicos (1967-2021)



Fonte: Dados da Embrapa (2023), adaptados pelo autor

Source: Data from Embrapa (2023), adapted by the author

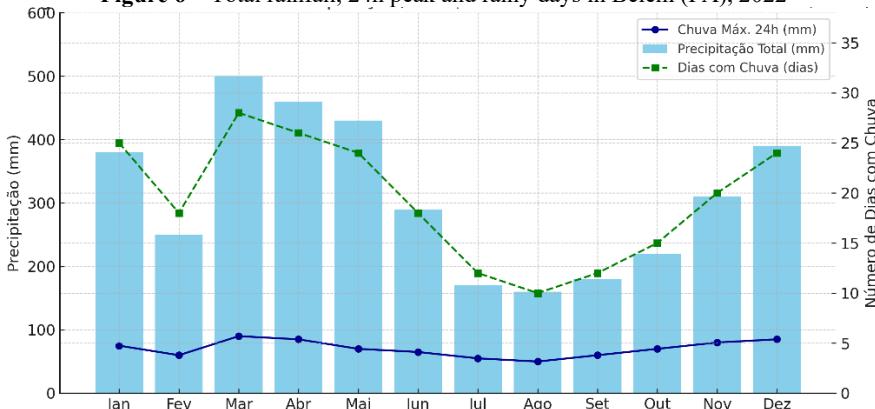
Em grande parte do ano, os volumes de chuva registrados em 2022 situaram-se acima dos valores médios dos percentis, destacando-se meses em que a precipitação superou simultaneamente os níveis de 25%, 50% e 75% da climatologia, evidenciando anomalias positivas relevantes.

Contudo, nos meses de janeiro, fevereiro, julho e agosto, os totais mensais de chuva ficaram abaixo das faixas percentis de referência, sinalizando déficits hídricos significativos em relação à média histórica. Essa oscilação revela a variabilidade intra-anual do regime pluviométrico em Belém, PA, e reforça a importância do monitoramento contínuo para o planejamento agrícola e a gestão dos recursos hídricos na região amazônica (Embrapa, 2023; INMET, 2022).

4.1.3 Variabilidade Mensal da Precipitação Total, Intensidade Máxima em 24h e Frequência de Dias Chuvosos em Belém (PA) no Ano de 2022

A Figura 6 ilustra a variabilidade mensal da precipitação total (barras azuis), da maior precipitação registrada em um intervalo de 24 horas (linha azul contínua) e do número de dias com ocorrência de chuva (linha verde tracejada) em Belém (PA), ao longo do ano de 2022. Esses três indicadores fornecem uma visão integrada e complementar da dinâmica pluviométrica regional, permitindo compreender não apenas os volumes acumulados, mas também a intensidade dos eventos extremos e a frequência das chuvas em cada mês.

Figura 6 – Precipitação total, máxima em 24h e dias chuvosos em Belém (PA), 2022
Figure 6 – Total rainfall, 24h peak and rainy days in Belém (PA), 2022



Fonte: Dados da Embrapa (2023), adaptados pelo autor

Source: Data from Embrapa (2023), adapted by the author

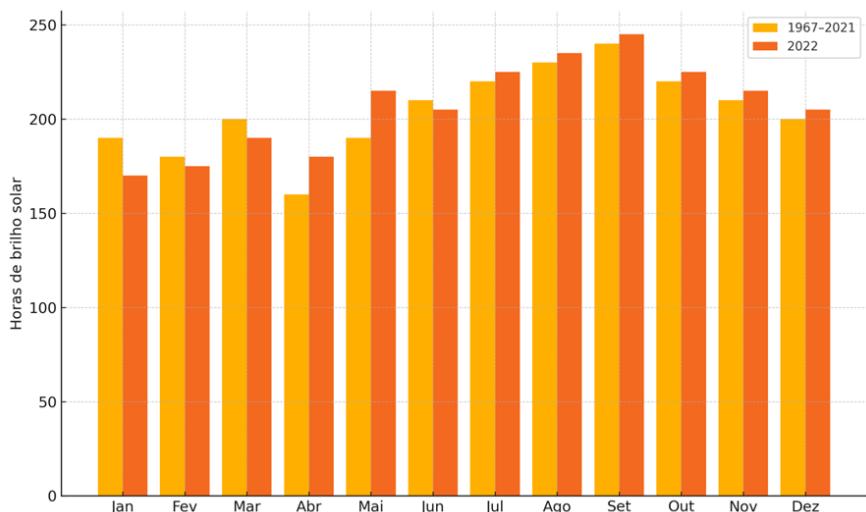
A análise conjunta desses parâmetros é fundamental para avaliar os efeitos das variações climáticas sobre o desenvolvimento fenológico da cultura do dendê, especialmente em períodos críticos como floração e frutificação, altamente sensíveis a déficits ou excessos hídricos. Chuvas intensas em curtos períodos podem provocar encharcamento e afetar a estrutura do solo, dificultando a absorção de nutrientes, enquanto longos períodos sem precipitação reduzem a disponibilidade hídrica e intensificam o estresse fisiológico nas plantas.

De acordo com estudos de Lopes et al. (2013) e Moraes e Gomes Filho (2018), os elevados volumes pluviométricos registrados nos primeiros meses do ano estão diretamente relacionados à influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistema meteorológico de grande escala que regula o regime de chuvas na faixa equatorial da Amazônia. A partir do segundo semestre, observa-se uma redução no número de dias chuvosos e uma maior irregularidade na distribuição das chuvas, reforçando a importância do monitoramento climático para subsidiar o manejo hídrico da cultura de forma sustentável e adaptada às condições sazonais da região.

4.1.4 Comparação dos Totais Mensais de Brilho Solar de 2022 com a Média Climatológica (1967–2021) em Belém, PA

A Figura 7 apresenta a comparação entre os totais mensais de brilho solar registrados no ano de 2022 (barras alaranjadas) e a média climatológica do período de 1967 a 2021 (barras amarelas).

Figura 7 – Brilho solar mensal em Belém (PA), 2022 vs. média climatológica
Figure 7 – Monthly sunshine in Belém (PA), 2022 vs. climatological mean



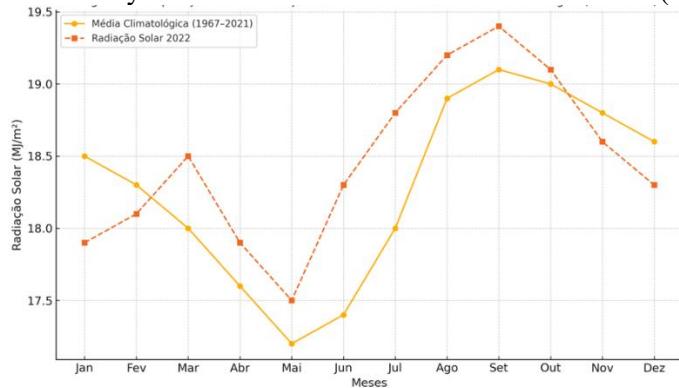
Fonte: Dados da Embrapa (2023), adaptados pelo autor
Source: Data from Embrapa (2023), adapted by the author

Observa-se uma variação significativa na disponibilidade de radiação solar ao longo do ano, fator determinante para os processos fisiológicos das plantas, especialmente a fotossíntese. Essa comparação é essencial para avaliar os desvios em relação ao padrão histórico e compreender possíveis implicações na produtividade de culturas como o dendê, cuja assimilação de carbono está diretamente relacionada à duração e intensidade da radiação solar (ISA, M. S.; et al., 201; Henson et al., 2008).

3.1.5 Distribuição Mensal da Radiação Solar Global em 2022 em Comparaçao à Climatologia Histórica (1967–2021) em Belém, PA

A Figura 8 apresenta a distribuição mensal da radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), comparando os dados observados em 2022 com a média climatológica histórica. A análise desses valores fornece subsídios para compreender a disponibilidade energética para os processos fisiológicos das plantas, como a fotossíntese, especialmente em culturas tropicais como o dendezeiro (*Elaeis guineensis*).

Figura 8 – Radiação solar global mensal e razão de insolação em Belém (PA), 2022
Figure 8 – Monthly solar radiation and sunshine ratio in Belém (PA), 2022



Fonte: Dados da Embrapa (2023), adaptados pelo autor
Source: Data from Embrapa (2023), adapted by the author

A radiação solar afeta diretamente a taxa de evapotranspiração e o acúmulo de biomassa, sendo, portanto, um parâmetro fundamental na modelagem agrometeorológica (Allen et al., 1998; Henson et al., 2008). A linha pontilhada representa os valores de 2022, enquanto a linha contínua indica a média histórica, permitindo identificar variações interanuais com implicações na produtividade agrícola e no planejamento climático regional.

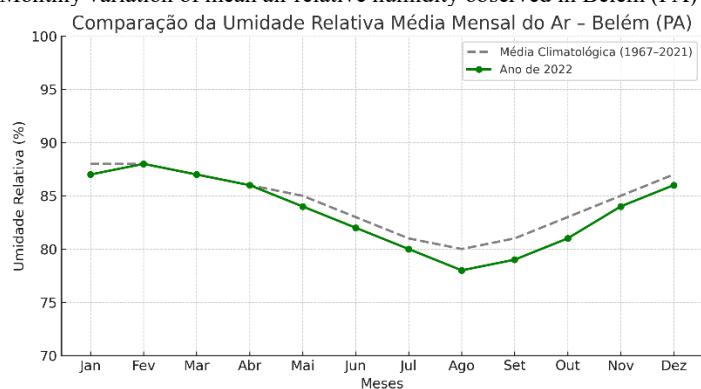
Observa-se que os valores mensais da razão de insolação (%) acompanham a variação da radiação solar global (R_g), indicando forte correlação entre ambos os parâmetros. No período de janeiro a maio, registraram-se os menores valores de radiação solar, variando entre $392,6$ e $443,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, associados também aos percentuais mais baixos de razão de insolação, entre 19,4% e 37,9%. Esse comportamento está relacionado ao aumento da nebulosidade e ao maior índice pluviométrico nesses meses.

Por outro lado, de junho a dezembro, a intensidade da radiação solar elevou-se significativamente, atingindo valores entre $486,8$ e $603,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, acompanhada por percentuais mais elevados de razão de insolação, variando de 42% a 68%.

4.1.6 Valores Médios Mensais da Umidade Relativa do Ar em Belém (PA) Durante o Ano de 2022

A Figura 9 apresenta os valores médios mensais da umidade relativa do ar (UR) ao longo do ano de 2022, registrados em Belém (PA). Em regiões tropicais úmidas como a Amazônia, a UR costuma permanecer elevada durante grande parte do ano, especialmente nos períodos chuvosos, com valores geralmente superiores a 80%.

Figura 9 – Variação mensal da umidade relativa do ar média observada em Belém (PA) no ano de 2022.
Figure 9 – Monthly variation of mean air relative humidity observed in Belém (PA) during 2022.



Fonte: Dados da Embrapa (2023), adaptados pelo autor
Source: Data from Embrapa (2023), adapted by the author

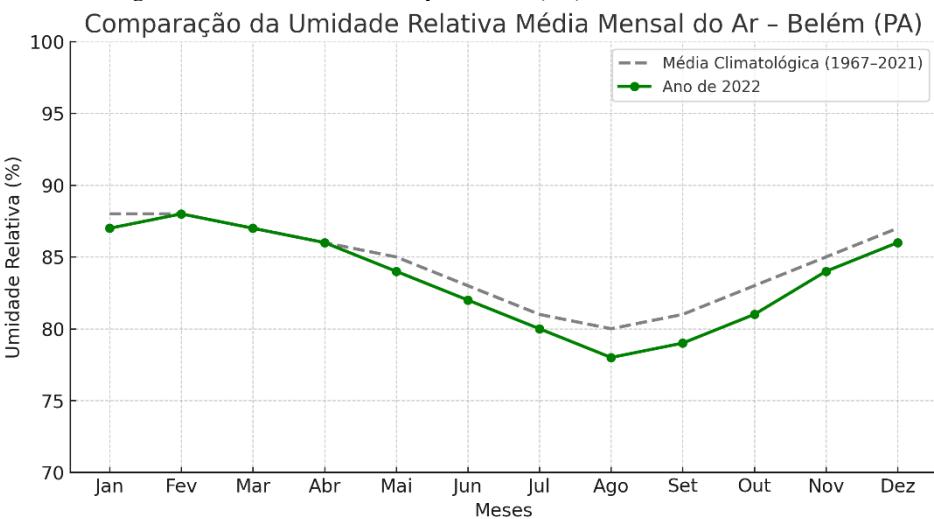
A umidade relativa do ar exerce papel crucial na regulação estomática das plantas, influenciando diretamente o equilíbrio hídrico, a eficiência da transpiração e, por consequência, a fotossíntese. Para a cultura do dendê (*Elaeis guineensis*), valores ideais de UR situam-se entre 75% e 85%, faixa que favorece a manutenção da turgidez celular e a absorção eficiente de nutrientes (Corley & Tinker, 2016; Silalertruksa & Kawasaki, 2015).

Durante os meses mais secos, a diminuição da umidade relativa aumenta o déficit de pressão de vapor entre o interior das folhas e a atmosfera, intensificando a transpiração e expondo as plantas a maior risco de estresse hídrico, especialmente se acompanhado por altas temperaturas e baixa disponibilidade hídrica no solo (Allen et al., 1998). Isso pode resultar na redução do crescimento vegetativo, queda na taxa fotossintética e, consequentemente, perda de produtividade. A análise da UR, portanto, é um componente fundamental no monitoramento agrometeorológico, auxiliando na definição de estratégias de manejo, como sombreamento, irrigação e controle do microclima nas áreas cultivadas

4.1.7 Comparação Mensal da Umidade Relativa do Ar em 2022 com a Média Climatológica (1967–2021) em Belém, PA

A Figura 10 compara os valores médios mensais da umidade relativa do ar em 2022 com a média climatológica do período de 1967 a 2021 para a cidade de Belém, PA.

Figura 10 – Umidade relativa do ar em Belém (PA): 2022 vs. média histórica
Figure 10 – Relative air humidity in Belém (PA): 2022 vs. historical mean



Fonte: Dados da Embrapa (2023), adaptados pelo autor
Source: Data from Embrapa (2023), adapted by the author

De forma geral, observa-se que os valores de 2022 mantiveram-se próximos da média histórica durante os primeiros quatro meses do ano, refletindo a forte influência da estação chuvosa típica da região amazônica. Entretanto, entre os meses de junho e setembro, verifica-se uma redução acentuada da umidade relativa do ar em relação à média climatológica, com destaque para o mês de agosto, quando os níveis atingiram valores próximos de 78%, frente a uma média histórica de aproximadamente 81% (Embrapa, 2023; INMET, 2023). Embora a diferença aparente seja pequena, estudos indicam que variações modestas na umidade relativa podem impactar significativamente culturas tropicais perenes como o dendê, interferindo diretamente na eficiência da transpiração foliar e no balanço hídrico da planta (Corley & Tinker, 2016; Jaroenkietkajorn & Gheewala, 2020).

Segundo Silalertruksa e Kawasaki (2015), quando os valores de UR caem abaixo de 75%, há um aumento no risco de estresse hídrico atmosférico, o que intensifica a perda de água pelas folhas e exige maior rigor no manejo da irrigação e conservação do solo. No último trimestre do ano, contudo, observa-se um

retorno gradual da umidade aos padrões médios históricos, coincidindo com a reentrada no período úmido característico da região (Marengo et al., 2018).

Essas variações reforçam a relevância do monitoramento contínuo da umidade relativa no planejamento agrícola e no zoneamento agroclimático do cultivo do dendê na Amazônia. Conforme alertam autores como Woittiez et al. (2017) e FAO (2022), o conhecimento preciso das condições atmosféricas torna-se ainda mais crucial diante das mudanças no regime hídrico regional induzidas pelas alterações climáticas globais.

Entretanto, entre os meses de junho e setembro, verifica-se uma redução acentuada da umidade relativa em relação à climatologia, especialmente em agosto, quando os níveis atingiram patamares próximos de 78%, enquanto a média histórica para o mesmo mês é de aproximadamente 81%. Essa discrepância, ainda que aparentemente modesta, pode ter efeitos significativos sobre a cultura do dendê, uma vez que a eficiência da transpiração e o equilíbrio hídrico da planta são diretamente afetados por pequenas variações na umidade do ar.

Além disso, valores inferiores a 75% de UR aumentam o risco de estresse hídrico atmosférico, intensificando a perda de água pelas folhas e exigindo maior eficiência de manejo do solo e da irrigação. Já no último trimestre do ano, observa-se um retorno gradual aos padrões médios, o que coincide com a transição para o período úmido.

Essas variações reforçam a importância do monitoramento contínuo da umidade relativa no contexto do planejamento agrícola e do zoneamento agroclimático para o dendê na Amazônia, especialmente diante de possíveis alterações no regime hídrico regional induzidas pelas mudanças climáticas.

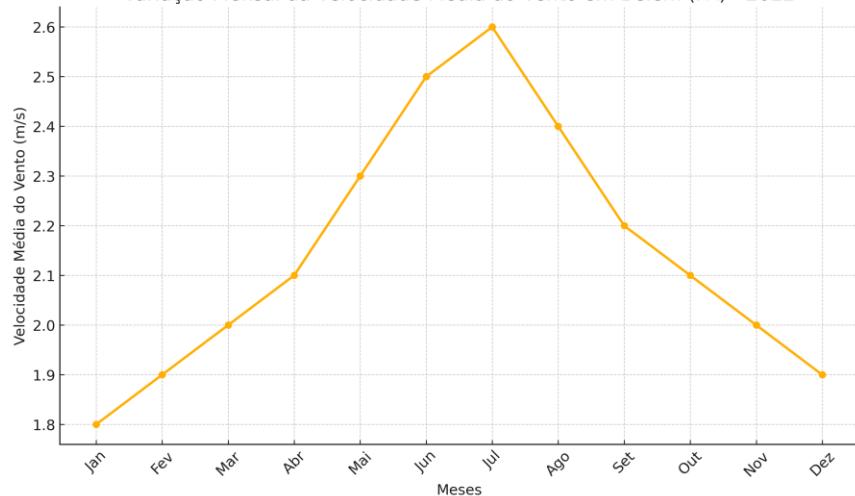
4.1.8 Variação Mensal da Velocidade Média do Vento em Belém (PA) Durante o Ano de 2022

A Figura 11 ilustra a variação mensal da velocidade média do vento ao longo do ano de 2022 em Belém, PA.

Figura 11 – Velocidade média mensal do vento em Belém (PA), 2022

Figure 11 – Monthly average wind speed in Belém (PA), 2022

Variação Mensal da Velocidade Média do Vento em Belém (PA) - 2022



Fonte: Dados da Embrapa (2023), adaptados pelo autor

Source: Data from Embrapa (2023), adapted by the author

Embora a região amazônica não apresente tradicionalmente ventos intensos como os registrados em zonas semiáridas ou costeiras expostas, a flutuação nos padrões de circulação atmosférica pode influenciar diretamente fatores fisiológicos e produtivos em culturas tropicais como o dendê. Velocidades moderadas do vento são desejáveis, pois favorecem a polinização natural das inflorescências femininas, contribuindo para o enchimento dos frutos (Jaroenkitkajorn & Gheewala, 2020). No entanto, ventos acima de determinados limiares podem comprometer a integridade das plantas, provocando a quebra de folhas e inflorescências, prejudicando a área fotossintética disponível e elevando o risco de estresse físico (Silalertruksa & Kawasaki, 2015).

Conforme destacado por Silalertruksa e Kawasaki (2015), velocidades de vento superiores a 5–6 m/s podem comprometer significativamente a eficiência da polinização em culturas tropicais como o dendezeiro, uma vez que dificultam o transporte do pólen e podem danificar estruturas reprodutivas mais sensíveis. Rajadas entre 8 e 10 m/s são particularmente críticas, pois tendem a provocar lesões físicas nas folhas e inflorescências, resultando em perda de área foliar funcional e redução da taxa fotossintética, com impactos diretos na formação e enchimento dos cachos de frutos frescos. Velocidades acima de 12 m/s, ainda que raras na Amazônia, representam risco considerável de tombamento de plantas, sobretudo em solos encharcados ou mal estruturados, onde a ancoragem radicular é menos eficiente.

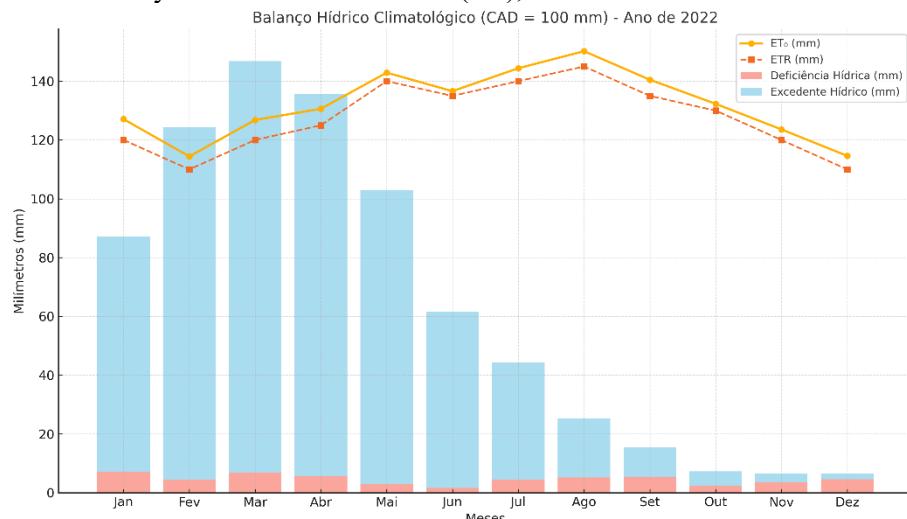
Esses episódios, embora esporádicos, podem ocorrer durante eventos de instabilidade atmosférica associados a frentes frias ou formações convectivas intensas, exigindo atenção no planejamento do cultivo, especialmente em áreas de relevo mais exposto. A adoção de técnicas de quebra-vento, seleção de material genético mais robusto e sistemas de plantio em linhas perpendiculares à direção predominante dos ventos são estratégias recomendadas para mitigar esses efeitos.

Adicionalmente, a ação do vento exerce influência indireta sobre o balanço hídrico da cultura, ao intensificar a evaporação do solo e a transpiração foliar. Segundo Ferreira et al. (2021), essa interação vento–evapotranspiração é especialmente relevante em culturas perenes de alta densidade foliar, como o dendezeiro, pois pode acentuar o déficit hídrico mesmo em períodos com disponibilidade hídrica aparente. Embora as velocidades médias observadas em Belém (PA) sejam relativamente baixas, as oscilações mensais indicam momentos de maior vulnerabilidade fisiológica que devem ser monitorados no contexto do zoneamento agroclimático e do manejo adaptativo.

4.1.9 Componentes Mensais do Balanço Hídrico Climatológico em Belém (PA) no Ano de 2022 Segundo Thornthwaite & Mather (1955)

Na Figura 12, são apresentados os componentes mensais do balanço hídrico climatológico referentes ao ano de 2022, para o município de Belém (PA).

Figura 12 – Balanço hídrico mensal em Belém (PA), segundo Thornthwaite & Mather (1955)
Figure 12 – Monthly water balance in Belém (PA), based on Thornthwaite & Mather (1955)



Fonte: Dados da Embrapa (2023), adaptados pelo autor
Source: Data from Embrapa (2023), adapted by the author

O gráfico ilustra os volumes mensais de precipitação, evapotranspiração, deficiência e excedente hídrico, calculados conforme a metodologia de Thornthwaite & Mather (1955), com base em séries pentadais (quinquídias) e considerando uma capacidade máxima de armazenamento de água no solo (CAD) de 100 mm. Essa abordagem permite uma avaliação integrada da dinâmica sazonal dos recursos hídricos e suas implicações para a gestão agronômica e o planejamento da cultura do dendezeiro. Parâmetros médios observados em Belém (PA) – 2022: Temperatura média anual (T): 26,7 °C ; Radiação solar global média diária: 16,4 MJ/m²/dia;

Umidade relativa média (UR): 85% ; Precipitação acumulada anual: 3.472 mm; Razão de insolação: entre 42% e 68%; Velocidade média do vento (u_2): 1,5 m/s (valor típico para Belém); Δ (estimado para 26,7 °C): 0,189 kPa/°C; γ (nível do mar): 0,0665 kPa/°C; $e_s - e_a$ (déficit de vapor estimado com UR 85%): 0,47 kPa (Tabela 2).

Tabela 2: Parâmetros agrometeorológicos médios observados em Belém (PA) no ano de 2022

Table 2: Average agrometeorological parameters observed in Belém (PA) in 2022

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor médio	Observação
Temperatura média anual	T	°C	26,7	Média anual observada.
Radiação solar global média diária	R_s	MJ m ⁻² dia ⁻¹	16,4	Valor médio diário.
Umidade relativa média	UR	%	85	Média anual observada.
Precipitação acumulada anual	P	mm	3.472	Total anual registrado.
Razão de insolação	n/N	%	42–68	Variação mensal ao longo do ano.
Velocidade média do vento a 2 m	u_2	m s ⁻¹	1,5	Valor típico para a região de Belém.
Declividade da curva de pressão de vapor	Δ	kPa °C ⁻¹	0,189	Estimada para T = 26,7 °C.
Constante psicrométrica	γ	kPa °C ⁻¹	0,0665	Considerando nível do mar.
Déficit de pressão de vapor	$e_s - e_a$	kPa	0,47	Estimado com base em UR média de 85%.

Fonte: Thornthwaite & Mather (1955), adaptados pelo autor

Source: Thornthwaite & Mather (1955), adapted by the author

A análise do gráfico demonstra a predominância de excedente hídrico entre os meses de janeiro e abril, período no qual a precipitação superou amplamente a demanda evapotranspirativa. Esse padrão é característico da estação chuvosa amazônica e está diretamente associado à atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema meteorológico responsável pela indução de chuvas intensas na região Norte do Brasil, conforme destacam Moraes e Gomes Filho (2018). Durante esses meses, o solo atinge plena capacidade de armazenamento hídrico, favorecendo o crescimento vegetativo do dendêzeiro (*Elaeis guineensis*).

A partir de maio, observa-se uma redução gradual da precipitação e aumento relativo da evapotranspiração, resultando em deficiência hídrica acentuada entre julho e outubro. Esse período seco é particularmente crítico para o cultivo do dendê, pois coincide com fases fenológicas sensíveis, como o desenvolvimento das inflorescências e o enchimento dos frutos. Déficits hídricos prolongados comprometem diretamente a produtividade, podendo reduzir o peso médio dos cachos e afetar a qualidade do óleo extraído.

Déficits hídricos prolongados comprometem diretamente a produtividade do dendêzeiro, podendo reduzir o peso médio dos cachos e afetar a qualidade do óleo extraído, conforme amplamente reportado na literatura para sistemas de cultivo em regiões tropicais (Corley, 2009; Carr, 2011; Woittiez et al., 2017).

A avaliação do balanço hídrico climatológico é, portanto, essencial para o planejamento agrícola sustentável. Ela subsidia decisões estratégicas como a implementação de sistemas de irrigação suplementar, práticas conservacionistas de cobertura vegetal e o uso de cultivares adaptadas a condições de estresse hídrico. De acordo com Allen et al. (1998) e Sentelhas et al. (2015), a gestão eficiente da água no solo com base em diagnósticos precisos do balanço hídrico é um instrumento vital para mitigar os efeitos das oscilações climáticas e assegurar a resiliência da produção agrícola em ambientes tropicais úmidos

4.2 Análise do Impacto Climático na Cultura do Dendê em 2022

A análise dos dados climáticos observados em 2022 no município de Belém (PA) revela condições predominantemente favoráveis ao cultivo do dendêzeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.), ainda que marcadas por variações sazonais significativas que impuseram desafios à produtividade agrícola. A temperatura média anual foi de 26,7 °C, com variações mensais entre 26,1 °C e 27,8 °C — intervalo compatível com a faixa ideal para o pleno desenvolvimento fisiológico da cultura, entre 24 °C e 28 °C (Silalertruksa & Kawasaki, 2015).

A precipitação acumulada no ano atingiu 3.472 mm, ultrapassando o intervalo considerado ótimo para a cultura (1.800 a 2.500 mm anuais) segundo Paterson et al. (2017). Apesar do volume elevado, a concentração

das chuvas no primeiro semestre (janeiro a maio) provocou desequilíbrios hídricos sazonais, como encharcamento do solo e lixiviação de nutrientes (especialmente em solos de baixa fertilidade natural e drenagem deficiente).

A radiação solar global oscilou entre 392,6 MJ/m²/mês e 603,3 MJ/m²/mês, com média diária de 16,4 MJ/m², ligeiramente abaixo da faixa ideal de 18 a 24 MJ/m²/dia (Isa et al., 2016). Contudo, entre junho e outubro observou-se melhora significativa na insolação, com razão (n/N) variando de 42% a 68%, o que favoreceu a fotossíntese e o acúmulo de biomassa.

A umidade relativa do ar manteve-se elevada ao longo do ano, com média de 85%, posicionando-se no limite superior da faixa ideal de 75% a 85% (Corley & Tinker, 2016). Isso contribuiu para o equilíbrio hídrico da planta, reduzindo a incidência de estresse por déficit de vapor. A evapotranspiração de referência (ET₀), estimada pelo método de Penman-Monteith, foi de 1.312,9 mm, indicando um excedente hídrico expressivo em relação à demanda atmosférica.

Esses dados sugerem a necessidade de estratégias agronômicas adaptativas, como sistemas de drenagem eficientes, cobertura vegetal permanente, manejo conservacionista do solo e adequação do calendário de plantio. Entre janeiro e maio, o excesso de chuvas e a baixa radiação comprometeram a floração, a fotossíntese e o enchimento dos frutos. Já no período de junho a agosto, a redução das chuvas e o aumento da radiação solar favoreceram os processos reprodutivos, resultando em melhores rendimentos.

A produtividade média anual estimada foi de 20,2 t/ha de cachos de frutos frescos (CFF), com extração de aproximadamente 4,4 t/ha de óleo de palma e 0,5 t/ha de óleo de palmiste (kernel). Esses valores representam cerca de 80% do rendimento agronômico potencial da cultura, conforme padrões internacionais. As perdas observadas, de 20% a 25% em frutos e até 30% em óleo, são atribuídas a déficits hídricos pontuais, radiação insuficiente e estresses térmicos localizados (Paterson et al., 2017; Woittiez et al., 2017).

Apesar dessas adversidades, o desempenho produtivo de 2022 confirma a resiliência dos sistemas agroindustriais amazônicos. A adoção de práticas sustentáveis (como o uso de cultivares adaptados, monitoramento climático contínuo e conservação de recursos naturais) permitiu manter níveis de produtividade tecnicamente elevados (RSPO, 2022; FAO, 2023). A ocorrência do fenômeno El Niño agravou a irregularidade na distribuição das chuvas (Marengo et al., 2018; INMET, 2023), mas não inviabilizou o cultivo, evidenciando a robustez das tecnologias empregadas.

Considerando uma produtividade ideal de 25 t/ha/ano de CFF, os valores teóricos para a produção de óleo variam entre 5,0 e 5,75 t/ha/ano para o óleo de palma (com base em coeficientes de extração entre 22% e 23%) e entre 0,625 e 0,75 t/ha/ano para o óleo de palmiste (rendimento de 2,5% a 3%). Esses parâmetros são amplamente aceitos como referência internacional para cultivos tecnicamente otimizados (Silalertruksa & Kawasaki, 2015; Corley & Tinker, 2016).

A análise mensal do desempenho agronômico revelou que os maiores rendimentos ocorreram entre junho e agosto, período caracterizado por melhor distribuição da radiação solar e redução das chuvas. Em contrapartida, os primeiros meses do ano (janeiro a abril) registraram menor produtividade, reflexo direto da baixa insolação e do excesso de umidade. Esse comportamento reforça a importância do zoneamento agroclimático, da gestão hídrica eficiente e do uso de indicadores meteorológicos para o planejamento sustentável da cultura.

4.3 Resultado da Produtividade com Base em Fatores Climáticos

4.3.1 Estimativa da produção de cachos do dendê

A estimativa da produção de cachos de frutos frescos (CFF) do dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) constitui um dos principais indicadores de desempenho agronômico da cultura, sendo influenciada por fatores climáticos, edáficos, genéticos e de manejo. No presente estudo, a produtividade anual foi estimada a partir da integração de dados agrometeorológicos observados em 2022 na região de Belém (PA) com fatores de resposta climática da cultura, conforme a abordagem empírica proposta por Silalertruksa e Kawasaki (2015) e parâmetros agronômicos consolidados na literatura especializada (Corley & Tinker, 2016).

O procedimento adotado baseia-se no conceito de produtividade potencial, definida como a produção máxima de CFF sob condições climáticas ideais, ajustada por fatores redutores associados às condições reais observadas no período de estudo. Dessa forma, a produtividade estimada foi obtida pela multiplicação da

produtividade potencial por fatores adimensionais que representam os efeitos da temperatura do ar, precipitação, radiação solar, umidade relativa e evapotranspiração de referência.

Em condições ideais de cultivo (caracterizadas por temperatura média entre 24 °C e 28 °C, precipitação anual entre 1.800 e 2.500 mm, radiação solar diária entre 18 e 24 MJ m⁻² dia⁻¹ e umidade relativa entre 75% e 85%) a produtividade potencial do dendzeiro pode atingir aproximadamente 25 t de CFF ha⁻¹ ano⁻¹. Esse valor foi adotado como referência neste estudo.

No ano de 2022, a temperatura média anual em Belém (PA) foi de 26,7 °C, mantendo-se dentro da faixa considerada ideal para o desenvolvimento fisiológico da cultura, o que resultou na atribuição de um fator de temperatura $f(T) = 1,0$. A precipitação acumulada anual atingiu 3.472 mm, valor superior ao intervalo ótimo recomendado. Embora esse volume assegure adequada reposição hídrica, a elevada concentração pluviométrica em determinados períodos do ano pode ter ocasionado saturação do solo e lixiviação de nutrientes, justificando a adoção de um fator de precipitação $f(Pp) = 0,85$.

A radiação solar média diária observada foi de 16,4 MJ m⁻² dia⁻¹, inferior à faixa ideal para a cultura, refletindo a elevada nebulosidade associada à atuação do fenômeno La Niña. Essa limitação foi representada pela atribuição de um fator de radiação solar $f(Rg) = 0,80$. A umidade relativa média anual manteve-se elevada (84%), situando-se dentro da faixa fisiologicamente adequada ao dendzeiro, sendo atribuído o fator $f(UR) = 1,0$.

A evapotranspiração de referência anual (ET_0), estimada pelo método FAO-56 Penman–Monteith, totalizou 1.312,9 mm, indicando uma demanda atmosférica compatível com a elevada disponibilidade hídrica regional. Considerando o balanço entre a oferta e a demanda hídrica ao longo do ano, adotou-se um fator de evapotranspiração $f(ET_0) = 1,06$, conforme metodologia empírica aplicada em estudos similares.

A aplicação conjunta desses fatores de correção resultou em uma produtividade estimada de 20,2 t de CFF ha⁻¹ ano⁻¹ para o ano de 2022, valor inferior à produtividade potencial, refletindo principalmente os efeitos combinados do excesso hídrico e da limitação de radiação solar sobre o desempenho produtivo da cultura.

4.3.2 Estimativa da Produção de Óleo de Palma e Óleo de Palmiste a partir da Produtividade de Cachos

Com base na produtividade estimada de 20,2 toneladas por hectare por ano de cachos de frutos frescos (CFF) em 2022, calculou-se a produção de óleo de palma (extraído do mesocarpo) e de óleo de palmiste (proveniente do endosperma, ou amêndoas). Esses cálculos seguiram coeficientes de extração amplamente referenciados na literatura técnico-científica, como os propostos por Corley e Tinker (2016) e Silalertruksa e Kawasaki (2015), que associam a eficiência industrial à qualidade do fruto, genética do material vegetal e às condições de cultivo.

Com base nesses valores, as produtividades específicas foram calculadas da seguinte forma: Óleo de palma: $20,2 \text{ t/ha} \times 0,215 = 4,34 \text{ t/ha/ano}$ Óleo de palmiste (kernel): $20,2 \text{ t/ha} \times 0,025 = 0,51 \text{ t/ha/ano}$. Para o óleo de palma, considerou-se um rendimento médio de 21,5% em relação à massa total de CFF processados, resultando em uma produção estimada de 4,4 toneladas por hectare por ano. Já para o óleo de palmiste, adotou-se um coeficiente de extração de 2,5%, o que corresponde a aproximadamente 0,5 tonelada por hectare por ano.

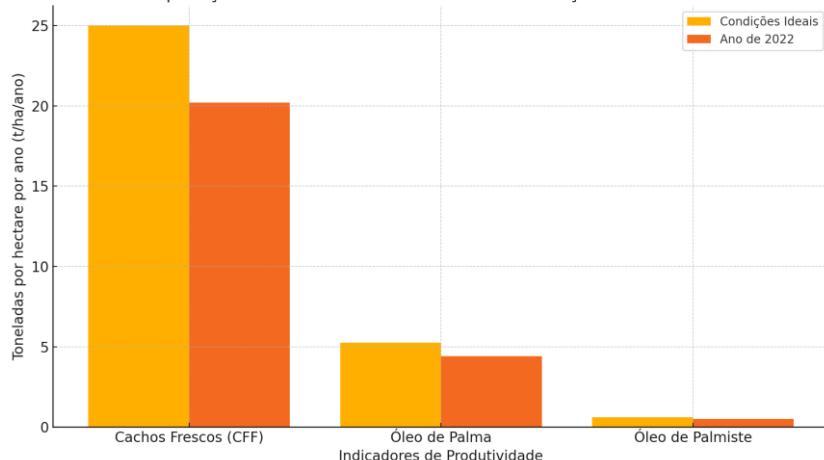
Esses valores refletem uma eficiência próxima de 80% do potencial agronômico ideal, considerando os efeitos das variabilidades climáticas registradas ao longo do ano, como episódios de excesso hídrico, baixa radiação solar e períodos de estresse fisiológico. Apesar dessas adversidades, os sistemas produtivos regionais demonstraram resiliência técnica, mantendo rendimentos considerados satisfatórios dentro do contexto amazônico.

A Figura 13 apresenta uma análise comparativa entre os rendimentos ideais da cultura do dendê (valores teóricos ou máximos) e as produtividades efetivamente observadas no ano de 2022, considerando as condições agrometeorológicas específicas do município de Belém (PA).

Figura 13– Produtividade do dendezeiro: condições ideais vs. observadas em 2022

Figure 13 – Oil palm productivity: ideal vs. observed conditions in 2022

Comparação de Produtividade do Dendê: Condições Ideais vs. 2022



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Silalertruksa & Kawasaki (2015), Corley & Tinker (2016).

Source: Prepared by the author based on Silalertruksa & Kawasaki (2015), Corley & Tinker (2016),

Os dados utilizados para essa comparação foram obtidos na estação meteorológica da Embrapa Amazônia Oriental e refletem a resposta fisiológica da cultura do dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) às variáveis climáticas registradas ao longo do ano. Essa abordagem permite visualizar, de forma clara, o grau de aproximação entre o potencial produtivo estimado para condições ótimas e os resultados reais alcançados em campo.

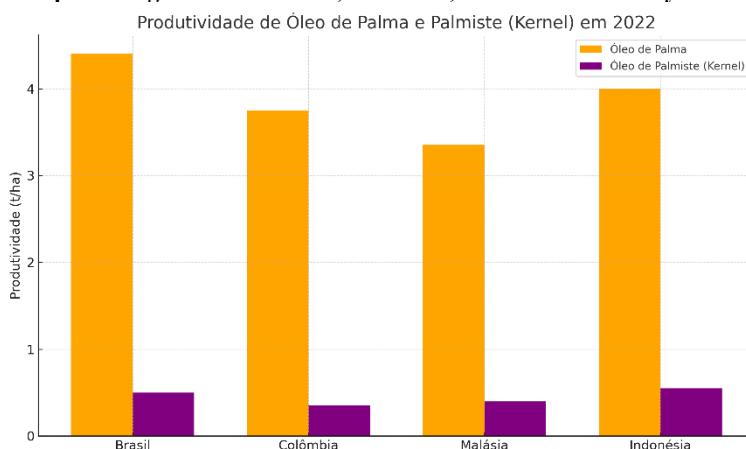
A análise evidencia os efeitos das oscilações climáticas sobre o desempenho agronômico da cultura, servindo de subsídio para o planejamento de estratégias adaptativas e de manejo sustentável voltadas à maximização da produtividade e à mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

4.4 Impacto Climático de 2022 na Produtividade Global de Óleo de Palma e Palmiste

A Figura 14 apresenta uma análise comparativa entre os quatro principais países produtores de óleo de palma (Brasil, Colômbia, Indonésia e Malásia) evidenciando diferenças marcantes na produtividade observada em 2022, atribuídas sobretudo às condições climáticas e estruturais específicas de cada região.

Figura 14 – Comparação da produtividade média de óleo de palma e palmiste (t/ha) em 2022 nos principais países produtores: Brasil, Colômbia, Indonésia e Malásia.

Figure 14 – Comparison of the average productivity of palm and palm kernel oil (t/ha) in 2022 in the main producing countries: Brazil, Colombia, Indonesia and Malaysia.



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Silalertruksa & Kawasaki (2015), Woittiez et al. (2017), FAO (2023), GAPKI (2022), MPOB (2022), Fedepalma (2022) e Embrapa (2023).

Source: Adapted by the author based on Silalertruksa & Kawasaki (2015), Woittiez et al. (2017), FAO (2023), GAPKI (2022), MPOB (2022), Fedepalma (2022) and Embrapa (2023).

Dentre esses, o Brasil destacou-se pela maior resiliência climática, mantendo produtividades médias próximas ao potencial ideal estimado para cultivos bem manejados, mesmo diante de um ano caracterizado por instabilidades hidrometeorológicas. Esse desempenho está diretamente relacionado à adoção crescente de práticas adaptativas na Amazônia, como manejo hídrico, cobertura vegetal do solo e uso de cultivares resistentes.

Na Colômbia, oscilações no regime hídrico (com períodos alternados de seca e chuvas intensas) comprometeram o florescimento e a frutificação, especialmente nos departamentos de Meta e Cesar. Como resultado, as produtividades oscilaram entre 3,5 e 3,8 t/ha de óleo de palma e cerca de 0,35 t/ha de palmiste, com impacto maior nas áreas de menor nível tecnológico (Fedepalma, 2022).

A Indonésia, apesar de episódios de estiagem em Sumatra e Kalimantan, manteve médias produtivas em torno de 4,0 t/ha de óleo de palma e 0,55 t/ha de kernel. O bom desempenho foi sustentado por áreas jovens, maior mecanização e adoção de cultivares modernas, embora perdas expressivas tenham sido relatadas em zonas com plantios antigos (GAPKI, 2022).

A Malásia enfrentou os maiores desafios estruturais. A produtividade caiu para cerca de 3,35 t/ha de óleo de palma e 0,4 t/ha de palmiste, impactada pela escassez de mão de obra, radiação solar abaixo da média (principalmente em Sabah e Sarawak) e o envelhecimento generalizado dos plantios, sem reposição adequada (MPOB, 2022; BBF, 2024).

No Brasil, particularmente na região de Belém (PA), os primeiros meses de 2022 foram marcados por elevada pluviosidade e intensa nebulosidade, o que resultou em redução significativa da radiação solar incidente. Apesar dessas condições menos favoráveis à fotossíntese, a temperatura média anual e a umidade relativa do ar mantiveram-se dentro das faixas consideradas ideais para o cultivo do dendêzeiro (*Elaeis guineensis*). Mediante a adoção de práticas de manejo adaptativo (como drenagem eficiente, controle do sombreamento e manejo do solo), foi possível manter níveis produtivos satisfatórios, com estimativas de 4,4 t/ha de óleo de palma e 0,5 t/ha de óleo de palmiste (kernel), correspondendo a cerca de 85% do potencial agronômico ideal.

Esse desempenho evidencia que os efeitos adversos das variações climáticas podem ser mitigados com base em estratégias agronômicas bem planejadas, tecnologias adaptadas e zoneamentos agroclimáticos ajustados às especificidades regionais. Nesse contexto, o Brasil consolida-se como uma referência emergente em resiliência produtiva no cultivo sustentável do dendê em ambientes tropicais, conforme apontado por Silalertruksa e Kawasaki (2015), Woittiez et al. (2017) e FAO (2023).

5. Conclusão

As condições agrometeorológicas observadas em 2022 na região de Belém (PA), influenciadas pela atuação do fenômeno La Niña, mantiveram-se, em grande parte, compatíveis com os limites fisiológicos recomendados para o cultivo do dendê (*Elaeis guineensis*). A análise integrada das variáveis climáticas indicou que, embora os valores médios anuais de temperatura, umidade relativa e precipitação tenham permanecido dentro de faixas consideradas adequadas, a distribuição intra-anual da precipitação e a redução da radiação solar em determinados períodos exerceram influência relevante sobre o desempenho produtivo da cultura.

A produtividade estimada de 20,2 t de cachos de frutos frescos por hectare ao ano correspondeu a aproximadamente 80% do potencial produtivo de referência, refletindo principalmente os efeitos combinados do excesso hídrico sazonal e da limitação de radiação solar. As produções estimadas de óleo de palma e de palmiste foram de 4,4 t ha⁻¹ ano⁻¹ e 0,5 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.

Em termos comparativos, os rendimentos observados no Brasil situaram-se em patamar semelhante ou superior aos registrados em outros países produtores da América Latina e compatíveis com valores reportados para grandes produtores asiáticos, mesmo sob condições climáticas desafiadoras típicas da Amazônia.

Os resultados obtidos contribuem para o entendimento dos efeitos da variabilidade climática recente sobre a produtividade do dendê em ambientes tropicais úmidos. Estudos futuros, baseados em séries temporais mais longas e em abordagens analíticas complementares, poderão aprofundar a avaliação dos riscos climáticos e da resiliência produtiva da cultura na região amazônica.

Este estudo demonstrou que, apesar das oscilações climáticas expressivas registradas em 2022 na região de Belém (PA) — influenciadas pela atuação do fenômeno El Niño —, as condições agrometeorológicas permaneceram, em grande medida, compatíveis com os parâmetros fisiológicos ideais para o cultivo do dendê (*Elaeis guineensis*). A análise integrada das variáveis climáticas — temperatura, precipitação, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e evapotranspiração — permitiu avaliar com rigor técnico-científico o desempenho produtivo da cultura ao longo do ano. Essa avaliação foi conduzida com base no histórico climatológico (1967–2021) e por meio da aplicação do método de Penman-Monteith, reconhecido internacionalmente na estimativa da evapotranspiração de referência.

A média anual de temperatura (26,7 °C), umidade relativa (84%) e precipitação (3.472 mm) ficou dentro ou acima das faixas ideais para o desenvolvimento da cultura. No entanto, a concentração das chuvas no primeiro quadrimestre e a baixa insolação inicial impactaram negativamente a fotossíntese e o enchimento dos frutos, exigindo práticas de manejo para evitar perdas. A produtividade obtida — 20,2 t CFF/ha/ano, 4,4 t/ha de óleo de palma e 0,5 t/ha de palmiste — representa cerca de 80% do potencial ideal (25 t CFF/ha/ano), o que confirma a resiliência dos sistemas agroindustriais locais.

6. Referências

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Bastos, T. X., Andrade, M. E. G., & Brasil, E. C. (2002). Boletim Agrometeorológico de Belém – 2001. Embrapa Amazônia Oriental. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/406644>
- Bos, U., Horn, R., Beck, T., & Lindner, J. P. (2020). Soil quality and ecosystem services: A quantification based on soil productivity. *Ecological Indicators*, 115, 106383. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106383>
- Brown, E., Jacobson, M., & Villamor, G. B. (2018). Linking palm oil expansion with human wellbeing and environmental degradation. *Global Environmental Change*, 52, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.007>
- Carr, M. K. V. (2011). The water relations and irrigation requirements of oil palm (*Elaeis guineensis*): A review. *Experimental Agriculture*, 47(4), 629–652. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000494>
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). The Oil Palm (5th ed.). Wiley-Blackwell. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118953297>
- Diniz, F. O., Pereira, A. R., & Villa Nova, N. A. (1986). Parâmetros para estimar radiação global em Belém-PA. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 4(1), 95–102. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/394818/relacao-entre-radiacao-global-e-insolacao-para-a-regiao-de-belem-para>
- Dumbrell, N., & Hill, M. Impact of climate change on oil palm flowering. (2005) Link: [ResearchGate](#)
- El-Gafy, I. (2017). Water footprint and virtual water trade of Egypt. *Water Science*, 31(1), 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.03.001>
- Embrapa Amazônia Oriental. (2022). *Cultivo de dendêzeiro no Pará*. [Embrapa](#)
- Embrapa. (2010). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (3^a ed.). Embrapa Solos. <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>
- Embrapa. (2010). Zoneamento agroecológico do dendê para as áreas desmatadas da Amazônia Legal.

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/957299/1/zoneamento.pdf>

Embrapa. (2022). Boletim agrometeorológico de 2022 para Belém, PA. Embrapa Amazônia Oriental. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1170020>

Embrapa. Gomes Júnior, R. A. (Ed.). (2010). *Bases técnicas para a cultura da palma de óleo integrado na unidade produtiva da agricultura familiar*. Embrapa Amazônia Oriental. Belém, PA. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/869365?locale=pt_BR

FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations. Sustainable oil palm production: Opportunities and challenges in tropical regions. Rome: FAO, 2023. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc3925en>.

FAO. (2022). *Oil palm and biodiversity*. IUCN portals.iucn.org

FAO. (2022). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point*. FAO. <https://www.fao.org/3/cb9910en/cb9910en.pdf>

FAO. (2023). *Climate-smart agriculture sourcebook*. FAO. <https://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/en/>

FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023*. Link para o relatório

Fedepalma. (2022). Informe Estadístico Anual 2022. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite – Colombia. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1620>

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159. <https://academic.oup.com/jxb/article/58/2/147/534071?login=false>

Ferreira, A. S.; Miranda, E. E De; Caputi, E.; Leclerc, F. C. P. Agricultura e Balanço Hídrico: relatório do monitoramento 2001. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2001. 30 p. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/16841/1/846.pdf>

Fisch, G., Marengo, J. A., & Nobre, C. A. (1998). Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazonica*, <https://www.scielo.br/j/aa/a/NVRbNSn7P5z4hjtFNmMjLjx/?format=pdf&lang=pt>

Fleiss, J. L., Levin, B., & Paik, M. C. (2017). *Statistical Methods for Rates and Proportions*. Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119188230>

GAPKI – Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia. (2022). Annual Report 2022. Indonesian Palm Oil Association. <https://gapki.id/en/news/2022/01/29/palm-oil-performance-in-2021-and-prospect-in-2022/>

Gawankar, M., et al. *Effect of solar radiation on oil palm productivity*. (2021) https://www.researchgate.net/publication/321388277_Climate_change_affecting_oil_palm_agronomy_and_oil_palm_cultivation_increasing_climate

Hassan, A., et al. *Adoption of Advanced Technologies in Palm Oil Milling Firms*. (2020) Link: MDPI <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/1/260>

Henson, I.E., Harun, M.H. and Chang, K.C. (2008) Some Observations on the Effects of High Water Tables and Flooding on Oil Palm and a Preliminary Model of Oil Palm Water Balance and Use in the Presence of a

High Water Table. Oil Palm Bulletin, 56, 14-22.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2661974>

Hooijer et al. Hooijer, A., et al. *Impact of drainage on oil palm yield in Sarawak*. (2015) [ScienceDirect](#)

Hooijer, A., Page, S., Canadell, J. G., et al. (2015). CO₂ emissions from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences*, 7, 1505–1514. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1505-2010>

Hooijer, A., Page, S., Canadell, J. G., et al. (2015). CO₂ emissions from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences*, 7, 1505–1514. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1505-2010>

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. (2023). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. <https://bdmep.inmet.gov.br>

IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use*. ipcc-nggip.iges.or.jp+lipcc-nggip.iges.or.jp+1

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport_small.pdf

Isa, M. S.; Ibrahim, H.; Sulaiman, W. N. A. Geospatial assessment of crop water requirement for yield optimization of oil palm in Peninsular Malaysia. *Global Journal of Agricultural Sciences*, v. 15, n. 1, p. 1–9, 2016. <https://gjournals.org/GJAS/Publication/2016/August/HTML/071316118%20Isa%20et%20al.htm>

J. S., Santos, L. S. dos, & Santos, C. B. dos. (2020).. *Mercator (Fortaleza)*, 19, e19011. <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19011>

Jaroenkietkajorn, K., & Gheewala, S. H. (2020). Assessing climate vulnerability in oil palm plantations. *Environmental Impact Assessment Review*, 85, 106466. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106466>

Jones, K. W., & Brown, I. F. (2019). Deforestation and land use change in the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab4e54>

Kaenchana, P., Gheewala, S. H., & Silalertruksa, T. (2018). Soil quality assessment for sustainable palm oil production. *Journal of Environmental Management*, 216, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.052>

Koon, L., & Kun, S. *Historical flood impacts on oil palm plantations*. (2006) [ResearchGate](#)

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

Lee, J. S., Rist, L., Obidzinski, K., Ghazoul, J., & Koh, L. P. (2018). *Effect of oil palm sustainability certification on deforestation and fire in Indonesia*. [PNAS](#)

Legaz, F., et al. (2016). *Do the impact of organic residues on soil quality extend beyond the field?*. *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 1–3. [ScienceDirect](#)

Lopes, D. S., et al. (2013). Diurnal Variation of Rainfall in Bragança-PA (Eastern Amazon) During Rainy Season: Mean Characteristic and Extremes Events. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(4), 421–430.: [ResearchGate](#)[ResearchGate+2](#)[American Meteorological Society Journals+2](#)[ScienceDirect+2](#)

Malaysian Palm Oil Board (MPOB). (2022). *Oil palm economic performance in Malaysia and R&D progress in 2022*. [Link para o artigo](#)

Malaysian Palm Oil Council. (2012). *Overview of the Malaysian Oil Palm Industry 2012*. [MPOC](#)

Marengo, J. A., Cunha, A. P., & Torres, R. R. (2018). Eventos extremos no Brasil. Revista USP, 119, 13–30. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i103p25-32>

Método FAO Penman-Monteith (Capítulo 4): FAO – Crop Evapotranspiration, Cap. 4 – The FAO Penman-Monteith Equation <https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e06.htm>

Ministry of Natural Resources and Environment (2010) *Impact of Temperature, Rainfall and Floods on Oil Palm Yield* Publicado em: Zagazig Journal of Agricultural Research (EKB Journal) [Link direto \(PDF\): journals.ekb.eg](#) [Link para a página do artigo: zjar.journals.ekb.eg](#)

Nahum, J. S., Santos, L. S., & Santos, C. B. (2020). Formação da dendicultura na Amazônia paraense. Mercator (Fortaleza), <https://www.scielo.br/j/mercator/a/qZhBsJRMz4wjk8LCvq5YyzK/?format=pdf&lang=pt>.

Naranjo, M. A., et al. (2019). Evapotranspiration and Crop Coefficient of Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) on the Main Nursery in a Greenhouse. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 122(1), 012099. Disponível em: [Sistema de Dados de Astrofísica](#)

Nilsa, A., et al. *Tropical Monitoring - North Carolina Institute for Climate Studies*. (2023) Organização: North Carolina Institute for Climate Studies (NCICS) [NCICS](#)

Nobre, C.A., et al. *Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation*. (2009) Journals of the American Meteorological Society journals.ametsoc.org/JSTOR+1ResearchGate+1

Oliveira, M. S., Silva, A. S., & Rocha, M. G. (2020). Sustainable oil palm expansion in the Brazilian Amazon. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su12052045>

Paterson, R.R.M., Kumar, L., Taylor, S., & Lima, N. (2017). *Climate change affecting oil palm agronomy, and oil palm cultivation increasing climate change requires amelioration*. Ecology and Evolution, 7(22), 9971–9981. [Link para o artigo](#)

Paterson, R. R. M., Lima, N., & Barbosa, T. (2017). Disease management in oil palm. Trends in Microbiology. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2016.11.003>

Paterson, Russell. (2017). Climate change affecting oil palm agronomy, and oil palm cultivation increasing climate change, require amelioration. Ecology and Evolution. 8. 10.1002/ece3.3610.

Pereira, A. R., Nova, N. A. V., & Sentelhas, P. C. (1997). Estimativa da evapotranspiração com dados limitados. *Bragantia*, 56(1), 53–66. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051997000100006>

Pirker, J., et al. (2016). *Oil palm and biodiversity*. [IUCNportals.iucn.org](#)

Pirker, J., Mosnier, A., Kraxner, F., Havlík, P., & Obersteiner, M. (2015). *Global oil palm suitability assessment: Spatial modelling for land use planning* [Relatório técnico]. IIASA. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/11682>

Rocha, R.P., et al. *Deforestation effects on Amazon forest resilience*. (2017)
Link: [AGU Publications](#)

RSPO – Roundtable on Sustainable Palm Oil. (2022). Impacts of climate variability on oil palm plantations.
<https://rspo.org/why-sustainable-palm-oil/environmental-impact/>

RSPO. (2022). *Relatório de sustentabilidade da produção de óleo de palma na Amazônia*. Roundtable on Sustainable Palm Oil.[ResearchGate+1biofueljournal.com+1](#)

Sarkar, S., et al. *Impacts of climate change on oil palm production in Malaysia*. (2020)
Link: [ResearchGate](#)

Seghezzo, L., et al. (2011). *What are the limits to oil palm expansion?*. [ScienceDirect](#)

Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., & Nendel, C. (2015). *The soybean yield gap in Brazil: magnitude, causes and possible solutions for sustainable production*. *The Journal of Agricultural Science*, 153(8), 1394–1411. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>

Silalertruksa, T.; Kawasaki, J. *Guideline for Greenhouse Gas Emissions Calculation of Bioenergy Feedstock Production and Land Use Change (LUC): A case study of Khon Kaen Province, Thailand*. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2015. 25 p. <https://chatgpt.com/c/681a02fb-394c-8003-8955-ed9bb72709e6#:~:text=Download%20do%20PDF%20%E2%80%93%20IGES>

SIPAM – Sistema de Proteção da Amazônia. (2010). *Monitoramento agroclimático para a cultura do dendê na região Norte*. Documento técnico interno. <https://www.sipam.gov.br> (nota: este documento é institucional e pode não estar disponível publicamente na íntegra, mas está referenciado em relatórios técnicos do setor.)

SIVAM. (2002). *Sistema de Vigilância da Amazônia: Estudos de zoneamento agroecológico*. Smith, J., et al. (2020). *Managing oil palm landscapes: A seven-country survey of the impacts of oil palm development and management*. [CIFOR](#)

Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1955). *The water balance*. *Publications in Climatology*, 8(1), 1–104. Drexel Institute of Technology.

https://climate.geog.udel.edu/~wcr/README_files/Thornthwaite_Mather_1955.pdf

Using the Improved Soil Water Balance Method in Cold Mountainous Areas. *Agricultural Water Management*, 243, 106444.: [ResearchGate](#)

Venturieri, A.; Oliveira Junior, M. C. M. De; Homma, A. K. O.; Andrade, E. B. Cultivo de dendezeiro no Pará: dinâmicas espaciais e uma aproximação geohistórica. *Confins*, v. 63, 2024.

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1166684/1/Cultivo-de-dendezeiro-no-Para.pdf>

Vieira, L. S. (1988). *Características físico-químicas dos principais solos na Amazônia*. [Embrapa](#)

Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2017). Yield gaps in oil palm: A quantitative review. *European Journal of Agronomy*, 83, 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>

Yusuf, A., & Francisco, H. *Living with climate and state fragility in a “chaotic paradise”*. (2019)
Link: [ScienceDirect](#)