

CAPÍTULO 1

Mudanças climáticas e a vulnerabilidade da cafeicultura no Espírito Santo: riscos, impactos e estratégias de adaptação

Luana Salvador, Emily de Matos Barbosa, Alex Justino Zacarias, Paola Delatorre Rodrigues, Laís Viana Bruneli, Paloma Imaculada de Oliveira Besteti, Karenn Zavarize Bermond, José Elias Alves Adão, Fernanda Barcelos de Paula, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c1>

Resumo

O café, uma das *commodities* agrícolas mais relevantes em escala global, enfrenta crescentes desafios diante dos impactos das mudanças climáticas. No Espírito Santo, estado que ocupa posição de destaque como terceiro maior produtor nacional de café arábica e líder na produção de conilon, os efeitos dessas mudanças já são perceptíveis, afetando diretamente a produtividade, a qualidade dos grãos e a renda dos agricultores. Elevações nas temperaturas médias, irregularidade das chuvas, aumento da frequência de eventos extremos, como secas e geadas, além da intensificação de pragas e doenças, configuram um cenário preocupante para a sustentabilidade da cafeicultura capixaba. Este estudo tem como objetivo principal analisar de forma aprofundada os impactos das mudanças climáticas sobre as safras de café no Espírito Santo, por meio da identificação, caracterização e mapeamento de áreas mais suscetíveis ou já afetadas por essas alterações. A metodologia adotada inclui revisão bibliográfica atualizada, análise de dados climáticos e produtivos, além de estudos de campo realizados em propriedades cafeeiras de diferentes altitudes e zonas agroclimáticas. A pesquisa também propõe estratégias de mitigação e adaptação, como o uso de sombreamento, manejo conservacionista do solo, seleção de cultivares mais resilientes e práticas agroecológicas. Os resultados esperados buscam subsidiar políticas públicas, orientar técnicos e produtores, e contribuir para a manutenção da viabilidade econômica e ecológica da cafeicultura no contexto das transformações ambientais em curso.

Palavras-chave: Cafeicultura sustentável. Adaptação climática. Produção agrícola. Eventos extremos. Resiliência agrícola. Sistemas agroecológicos.

1. Introdução

As mudanças climáticas têm provocado transformações significativas nos sistemas naturais e humanos, afetando ecossistemas, biodiversidade e atividades socioeconômicas, especialmente a agricultura. Esses impactos ocorrem de forma gradual e acumulativa, com repercussões diretas sobre a produção agrícola, particularmente em culturas sensíveis às variações climáticas, como o café (Souza *et al.*, 2010; IPCC, 2022; Prado Tanure, 2020).

A produtividade cafeeira é influenciada por variáveis como temperatura, precipitação, umidade do ar e radiação solar. A espécie *Coffea arabica*, por exemplo, possui uma faixa ideal de temperatura entre 18°C e 22°C. Temperaturas superiores a 34°C podem causar o abortamento de flores, prejudicando o pegamento dos frutos e, conseqüentemente, reduzindo a produtividade (Assad *et al.*, 2004; Pinho *et al.*, 2021). Mesmo temperaturas moderadamente elevadas, entre 28°C e 33°C, já podem comprometer a taxa fotossintética, reduzir o número de folhas e afetar o metabolismo da planta (Camargo; Camargo, 2021).

No último século, a temperatura média global aumentou aproximadamente 1,1°C e, segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as projeções para 2040 indicam elevações que podem ultrapassar 2°C em cenários de alta emissão (IPCC, 2022). Tais mudanças impõem desafios crescentes à agricultura, exigindo adaptações urgentes em práticas de manejo e escolha de cultivares (Rodrigues *et al.*, 2021; Silva; Pinto, 2023).

A cadeia produtiva do café é altamente dependente das condições climáticas. Alterações no regime de chuvas, temperatura e radiação solar interferem não apenas na produtividade, mas também na qualidade sensorial da bebida, no desenvolvimento dos grãos e na dinâmica de pragas e doenças (Ogundeji *et al.*, 2019; Barbosa *et al.*, 2020). Floradas desordenadas, maturação desigual e aumento na incidência de doenças fúngicas são algumas das conseqüências observadas nas lavouras em regiões vulneráveis às mudanças climáticas (Figura 1).

O Espírito Santo ocupa posição estratégica na cafeicultura brasileira, sendo o maior produtor nacional de *Coffea canephora* (conilon) e o terceiro maior de

Coffea arabica (CONAB, 2023). No entanto, o estado já apresenta sinais dos impactos climáticos em curso, como redução dos volumes pluviométricos, aumento das temperaturas extremas e irregularidade no ciclo hídrico anual. Segundo o Incaper (2023), o trimestre de julho a setembro, correspondente ao inverno no Hemisfério Sul, registrou os menores acumulados de precipitação, com valores inferiores a 100 mm na porção oeste do estado, e anomalias térmicas significativas em diversas microrregiões.



Figura 1. Maturação irregular do café. Fonte: <https://rehagro.com.br/blog/maturadores-na-cultura-do-cafe/>.

Este estudo tem como objetivo compreender os impactos das mudanças climáticas sobre as safras de café no Espírito Santo, com foco na identificação, caracterização e mapeamento de áreas em risco ou já afetadas por eventos climáticos extremos. A proposta visa subsidiar a adoção de práticas agrícolas adaptativas, promovendo a sustentabilidade da produção cafeeira no estado.

A metodologia adotada compreende múltiplas etapas. Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica atualizada, com base em estudos recentes sobre mudanças climáticas e cafeicultura, estabelecendo um referencial teórico-metodológico sólido. Em seguida, foram coletados dados sobre geologia,

pluviosidade, uso e ocupação do solo, histórico de desastres naturais e indicadores climáticos locais.

A pesquisa de campo incluiu visitas técnicas a propriedades cafeeiras em distintas altitudes e zonas agroclimáticas, com registro visual das condições das lavouras por meio de dispositivos móveis e imagens de satélite (*Google Earth* e plataformas de sensoriamento remoto). O mapeamento espacial foi desenvolvido no software QGIS, utilizando variáveis como precipitação, temperatura, evapotranspiração e balanço hídrico, possibilitando a delimitação das áreas mais afetadas.

Adicionalmente, foi realizada uma consulta com produtores rurais por meio de questionários estruturados, respeitando os princípios éticos e legais de pesquisa. O levantamento visou registrar percepções sobre os impactos climáticos nas lavouras ao longo dos últimos anos, contribuindo com dados qualitativos para o diagnóstico regional.

Este projeto propõe ainda o uso de tecnologias baseadas em dados abertos e geoprocessamento para orientar ações de manejo específico por microrregião. Recomenda-se, com base nos resultados obtidos, a adoção de práticas conservacionistas como terraceamento, sombreamento, consórcios agroecológicos e recuperação de áreas degradadas, bem como o incentivo à pesquisa e extensão rural para promover a resiliência da cafeicultura capixaba frente às mudanças climáticas.

2. Painel atual sobre as mudanças climáticas

As evidências científicas mais recentes apontam que cada uma das últimas quatro décadas foi sucessivamente mais quente do que qualquer outra desde 1850. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), a temperatura média global da superfície — considerando a terra e os oceanos — entre 2001 e 2020 foi aproximadamente 0,99 °C [intervalo de confiança: 0,84 °C a 1,10 °C] superior à média do período pré-industrial (1850–1900). No intervalo de 2011 a 2020, esse aumento alcançou 1,09 °C [0,95–1,20 °C], com as elevações mais

acentuadas observadas sobre os continentes ($1,59\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$1,34\text{--}1,83\text{ }^{\circ}\text{C}$]), em contraste com os oceanos ($0,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$0,68\text{--}1,01\text{ }^{\circ}\text{C}$]) (IPCC, 2021; WMO, 2023).

Grande parte desse aquecimento é atribuída às atividades humanas, principalmente à queima de combustíveis fósseis e às mudanças no uso da terra, que aumentaram significativamente a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. O dióxido de carbono (CO_2), por exemplo, atingiu 419,3 partes por milhão (ppm) em 2023 — um valor sem precedentes nos últimos dois milhões de anos (NOAA, 2023) (Figura 2).

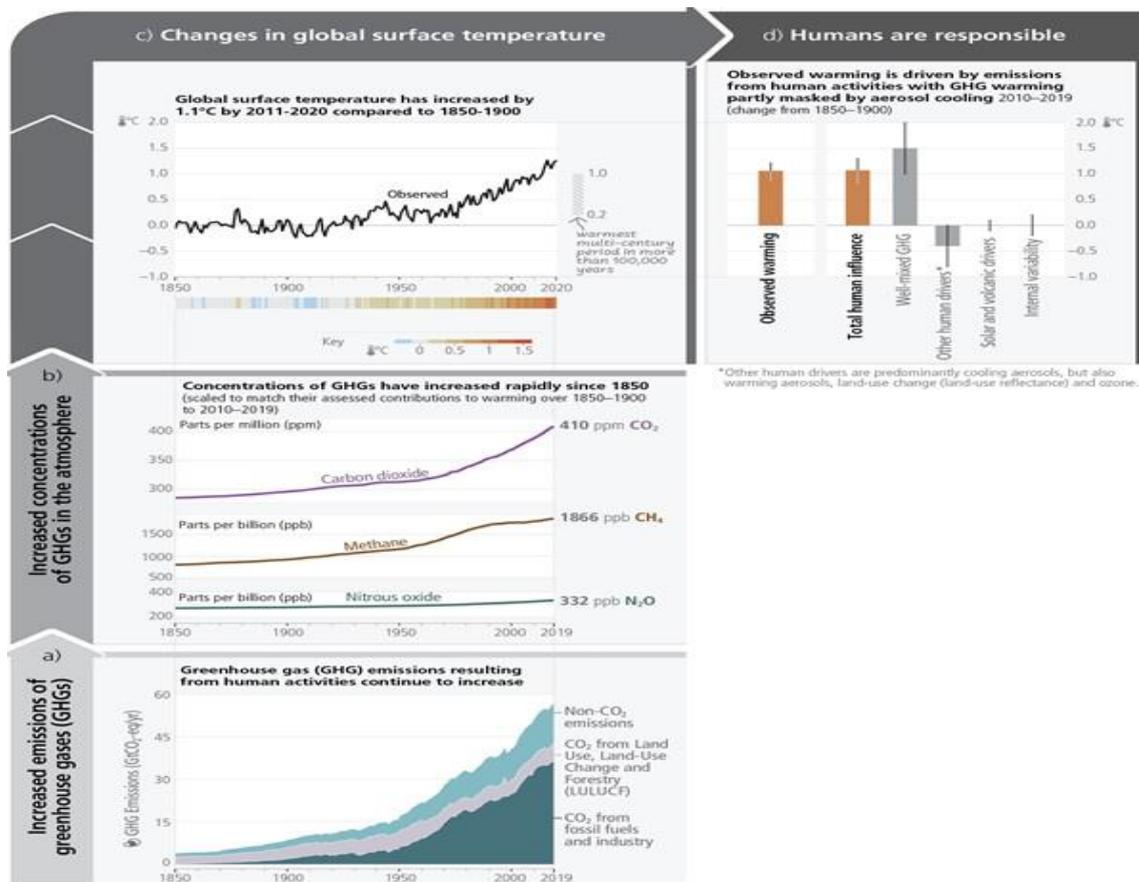


Figura 2. Atividades humanas são responsáveis pelo aquecimento global. a) Aumento das emissões de gases do efeito estufa; b) Aumento da concentração de gases de efeito estufa (GHG) na atmosfera; c) Mudança na temperatura da superfície global; d) Responsabilidade humana nas emissões. Fonte: Calvin et al. (2023).

Desde o 5º Relatório de Avaliação (AR5), avanços metodológicos importantes permitiram estimativas mais precisas e uma melhor representação

espacial do aquecimento, especialmente em regiões anteriormente sub-representadas, como o Ártico. Tais refinamentos metodológicos adicionaram cerca de 0,1 °C às estimativas anteriores, sem que isso represente aquecimento adicional real, mas sim maior precisão na detecção e mensuração do fenômeno (IPCC, 2021).

O relatório também evidencia que eventos climáticos extremos se tornaram mais frequentes e intensos em diversas regiões do planeta, incluindo ondas de calor, secas prolongadas, chuvas intensas e ciclones tropicais. As projeções para as próximas décadas indicam que, mesmo com esforços de mitigação, a temperatura média global poderá ultrapassar 1,5 °C já nas décadas de 2030 ou 2040, caso não haja uma rápida redução das emissões líquidas de gases de efeito estufa (IPCC, 2023; Rockström *et al.*, 2023).

Esses dados reforçam a urgência da adaptação e da resiliência climática, especialmente em setores como a agricultura, que dependem fortemente das condições ambientais estáveis para garantir segurança alimentar e desenvolvimento econômico sustentável.

2.1. Intensificação dos extremos climáticos e vulnerabilidades regionais

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (2021) e a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2023), as mudanças climáticas estão promovendo o aumento da frequência, intensidade e duração de eventos climáticos extremos em praticamente todas as regiões do globo. Ondas de calor, precipitações intensas, secas prolongadas e ciclones tropicais tornaram-se significativamente mais comuns desde a década de 1970, enquanto eventos de frio extremo vêm-se tornando menos frequentes e menos intensos.

Um dos fatores que agravam esses extremos é o aumento da evapotranspiração causado pelas temperaturas mais elevadas, o que contribui para a intensificação de secas agrícolas e ecológicas, especialmente em áreas com déficit hídrico persistente (IPCC, 2021; Rockström *et al.*, 2023). Esses efeitos, contudo, não ocorrem de maneira homogênea, pois características geográficas, topográficas e climáticas regionais modulam a vulnerabilidade dos ecossistemas e das populações humanas (Sampaio *et al.*, 2022).

No contexto brasileiro, as regiões Norte e Nordeste se destacam por sua maior suscetibilidade aos impactos das mudanças climáticas. Isso se deve, principalmente, à sua localização em latitudes mais baixas, ao predomínio de biomas sensíveis, como a Amazônia, Caatinga e Cerrado, e à combinação de alta radiação solar com vulnerabilidades socioambientais. Projeções indicam tendências preocupantes para esses biomas, com elevação acentuada das temperaturas e redução significativa da precipitação média ao longo do século XXI (Tanure, 2020; Lapola *et al.*, 2023).

Já os biomas localizados nas regiões Sul e Sudeste, como a Mata Atlântica e o Pampa, apresentam projeções mais moderadas de aumento térmico e, em algumas simulações, tendência de acréscimo nos índices pluviométricos, especialmente a partir da segunda metade do século (Tanure, 2020; IPCC, 2021).

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos cenários projetados de aumento de temperatura por bioma, considerando três intervalos temporais de projeção climática:

Tabela 1. Cenários projetados de aumento de temperatura por bioma, considerando três intervalos temporais de projeção climática:

Bioma	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Amazônia	1,0 – 1,5	3,0 – 3,5	5,0 – 6,0
Caatinga	0,5 – 1,0	1,5 – 2,5	3,5 – 4,5
Cerrado	1,0	3,0 – 3,5	5,0 – 5,5
Pantanal	1,0	2,5 – 3,0	3,5 – 4,5
Mata Atlântica (NE)	0,5 – 1,0	2,0 – 3,0	3,0 – 4,0
Mata Atlântica (S/SE)	0,5 – 1,0	1,5 – 2,0	2,5 – 3,0
Pampa	1,0	1,0 – 1,5	2,5 – 3,0

Fonte: IPCC, 2021.

2.2. Painel atual sobre as mudanças climáticas

As últimas quatro décadas foram, sucessivamente, as mais quentes desde o início dos registros instrumentais em 1850. A temperatura média global da superfície terrestre e oceânica entre os anos de 2001 e 2020 foi aproximadamente 0,99°C [0,84–1,10] superior à média do período pré-industrial (1850–1900). No intervalo de 2011 a 2020, esse aumento atingiu 1,09°C [0,95–1,20], com os maiores acréscimos registrados nos continentes (1,59°C [1,34–1,83]), em comparação aos oceanos (0,88°C [0,68–1,01]) (Calvin *et al.*, 2023; IPCC, 2023).

Desde a publicação do Quinto Relatório de Avaliação (AR5), os aprimoramentos metodológicos e a inclusão de novos conjuntos de dados resultaram em uma estimativa de temperatura ligeiramente superior, acrescentando cerca de 0,1°C à média global. No entanto, esse acréscimo não indica um aquecimento físico adicional desde o AR5, mas sim uma melhoria na representação espacial do aquecimento, especialmente em regiões como o Ártico (IPCC, 2023).

Esses dados revelam um cenário preocupante de intensificação das mudanças climáticas, com impactos cada vez mais evidentes nos ecossistemas, na segurança alimentar e nos modos de vida das populações vulneráveis. A Tabela 2 apresenta projeções da variação percentual da precipitação em diferentes biomas brasileiros ao longo do século XXI.

As alterações nos regimes de precipitação evidenciam um padrão de redução acentuada nas regiões norte, nordeste e centro-oeste, enquanto as regiões sul e sudeste tendem a apresentar aumento de precipitação, o que pode provocar eventos extremos, como secas e enchentes, impactando diretamente a produção agrícola.

Um dos desafios mais imediatos e urgentes das mudanças climáticas é o impacto direto na agricultura, afetando os ciclos fenológicos, a produtividade e a qualidade das culturas. Tais efeitos impõem riscos significativos à estabilidade econômica, à segurança alimentar e aos meios de subsistência de milhões de agricultores em todo o mundo (IPCC, 2023; Yuan *et al.*, 2024).

Tabela 2. Projeções da variação percentual da precipitação em diferentes biomas brasileiros ao longo do século XXI

Bioma / Período	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Amazônia	-10	-25 / -30	-40 / -45
Caatinga	-10 / -20	-25 / -35	-40 / -50
Cerrado	-10 / -20	-20 / -35	-35 / -45
Pantanal	-5 / -15	-10 / -25	-35 / -45
Mata Atlântica (NE)	-10	-20 / -25	-30 / -35
Mata Atlântica (S/SE)	+5 / +10	+15 / +20	+25 / +30
Pampa	+5 / +10	+15 / +20	+35 / +40

Fonte: Prado Tanure, 2020.

3. Lavouras de café afetadas por desastres naturais

O café, uma das *commodities* agrícolas mais valiosas do mundo, enfrenta um futuro cada vez mais incerto diante dos impactos das mudanças climáticas. Regiões atualmente consideradas ideais para o cultivo do café arábica, como a América Central e do Sul — especialmente o Brasil —, podem tornar-se significativamente menos propícias até meados do século (Bunn *et al.*, 2021; Läderach *et al.*, 2023).

Estudos recentes apontam que eventos climáticos extremos, como secas, inundações e geadas, têm causado sérios prejuízos à produção cafeeira. As secas prolongadas podem provocar estresse hídrico, afetando negativamente o florescimento, a frutificação e o enchimento dos grãos. Em contrapartida, inundações comprometem o sistema radicular das plantas e favorecem o surgimento de doenças fúngicas, como a podridão radicular (Ovalle-Rivera *et al.*, 2022).

A relação entre precipitação e produtividade também foi demonstrada por Múnera-Roldán *et al.* (2020), que verificaram que uma redução de 10% nas chuvas durante o período de floração pode ocasionar perdas de até 25% na produção. De forma semelhante, eventos de geada tendem a causar necrose nos ramos produtivos e danificação dos grãos, resultando em menor valor comercial e sensorial (Figura 3).



Figura 3. Cafeeiro sob condições ideais: exceção nos dias atuais. Fonte: <https://sindicafe-mg.com.br/posts/fase-da-maturacao-do-grao-de-cafe-necessita-cuidados>.

Além do impacto na produtividade, desastres naturais comprometem a qualidade dos grãos de café. Condições adversas, como seca severa, podem reduzir o teor de açúcares e compostos aromáticos nos frutos, além de elevar a acidez da bebida (Oliveira *et al.*, 2023). Esses efeitos culminam em cafés com menor pontuação sensorial, prejudicando nichos de mercado que valorizam bebidas finas.

Os impactos não se limitam ao campo agrônômico. Há profundas implicações socioeconômicas para os cafeicultores, especialmente os pequenos produtores. A redução na produtividade e na qualidade interfere diretamente na renda familiar, acentuando a insegurança alimentar e a vulnerabilidade socioeconômica. Segundo Gebre *et al.* (2023), na Etiópia, a elevação da temperatura e a irregularidade das chuvas podem levar à perda de milhares de postos de trabalho no setor cafeeiro até 2050, agravando desigualdades regionais (Figura 4).

Portanto, os desastres naturais, intensificados pelas mudanças climáticas, representam uma ameaça concreta ao futuro da cafeicultura global. A adoção de estratégias de adaptação — como o sombreamento, uso de variedades resistentes e práticas agroecológicas — torna-se urgente para garantir a resiliência do setor frente a esse novo cenário climático.



Figura 4. Lavoura de café conillon em Rio Bananal (ES) prejudicada pela seca. Foto: Sérgio Nunes para noticiasagricolas.com.

O Brasil se destaca como um dos principais centros de produção científica voltada à relação entre a cafeicultura e as mudanças climáticas, refletindo sua posição de liderança na produção mundial de café. A crescente preocupação com os impactos ambientais sobre a agricultura tem impulsionado pesquisas que buscam compreender e mitigar os efeitos das alterações climáticas sobre o cultivo do gênero *Coffea*, especialmente nas regiões tropicais. Uma análise bibliométrica realizada na base de dados Scopus, utilizando os descritores “*climate change*” e “*Coffea*” no período de 2019 a 2025, identificou 43 publicações científicas associadas a autores brasileiros, número que coloca o Brasil como o país com maior volume de produção acadêmica nesse tema específico, superando países como França, Portugal, Colômbia e Estados Unidos (SCOPUS, 2025) (Figura 5).

Esse protagonismo pode ser explicado, em parte, pela importância socioeconômica da cafeicultura no país, que responde por cerca de um terço da produção mundial de café, e pela crescente necessidade de desenvolver estratégias de adaptação e resiliência frente aos efeitos adversos do clima, como secas prolongadas, geadas tardias, aumento da temperatura média e alterações no regime de chuvas (Verdinassi *et al.*, 2021; Zuluaga *et al.*, 2022). O avanço da pesquisa nacional nessa área reforça a relevância de investimentos em ciência e inovação tecnológica voltada à agricultura sustentável, promovendo a segurança alimentar, a manutenção de empregos no meio rural e a conservação dos ecossistemas associados à produção cafeeira (Cohen *et al.*, 2013).

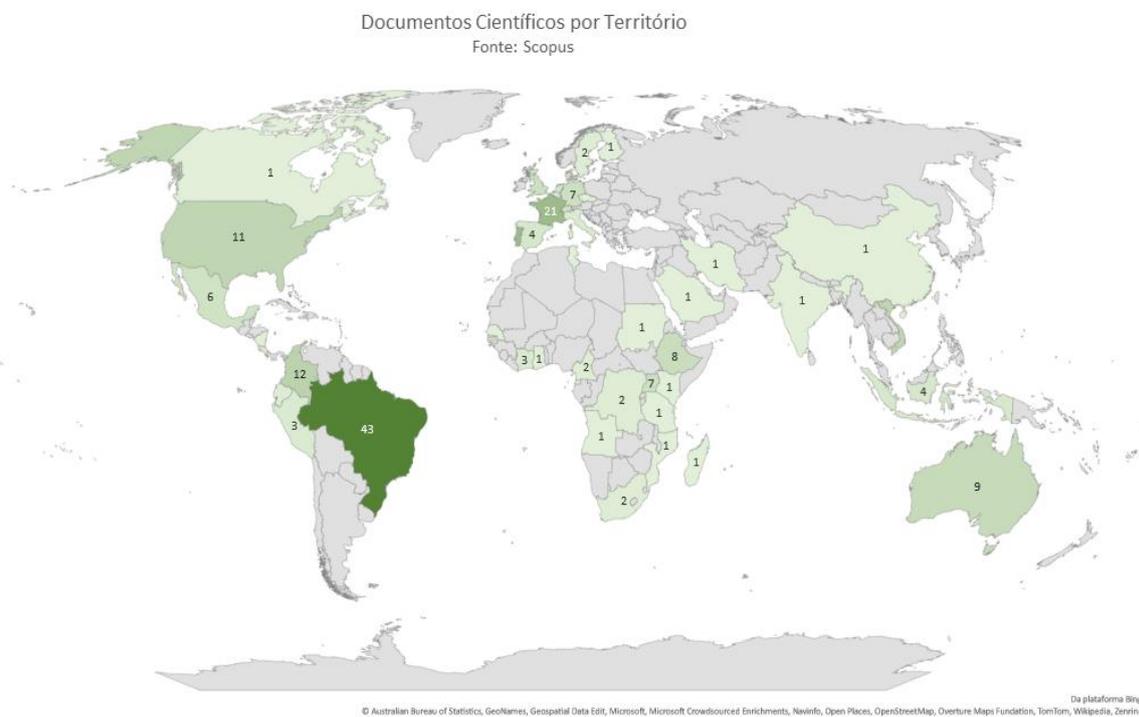


Figura 5. Publicações científicas na plataforma Scopus por território. Fonte: Scopus - Document search results. Adaptado por Luana Salvador, 2025.

4. Dados de mudanças climáticas no Espírito Santo

O Espírito Santo figura entre os estados brasileiros mais afetados pelas mudanças climáticas, especialmente no que se refere à frequência e intensidade dos extremos térmicos. Um estudo inédito da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp) revelou que, ao longo dos últimos 40 anos, o estado registrou um aumento de 188% na frequência de ondas de calor, quase o triplo da média nacional, que ficou em torno de 100%. Esse crescimento faz do litoral capixaba

a região mais impactada entre cinco regiões litorâneas estudadas (Sanches; Christofolletti, 2023)

Segundo os autores, além do aumento da frequência, o Espírito Santo foi o único entre os locais analisados a registrar crescimento também nos eventos extremos de frio, resultando em maior amplitude térmica diária. Esses extremos têm gerado impactos significativos na biodiversidade local, incluindo alterações comportamentais, fisiológicas e mortalidade em espécies marinhas e terrestres, com implicações também para a saúde pública e produtividade agrícola ([FOLHA DO ES](#)).

No ecossistema costeiro, o Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração (PELD/ES), coordenado pela UFES, observou que cerca de 500 hectares de manguezal foram mortos em 2016 por combinação de estiagem extrema e uma tempestade de granizo com ventos superiores a 100 km/h. Essa perda representou aproximadamente 30% da área total do manguezal do estuário do rio Piraquê-Açu-Mirim, comprometeu cerca de 20% do estoque de carbono local e interrompeu a recuperação natural por pelo menos 15 meses após o evento.

Quanto às projeções futuras, análises de modelagem climática regional com base nos cenários CMIP6 (RCP ou SSP) indicam que, até 2080, algumas regiões do Espírito Santo poderão enfrentar (agenciabrasil.ebc.com.br+15Instituto de Estudos Climáticos+15Instituto de Estudos Climáticos+15Instituto de Estudos Climáticos):

- ✓ Aumento de até 70 dias a mais em anos secos consecutivos (CDD, *consecutive dry days*) na porção norte do estado, em cenários de altas emissões;
- ✓ Aumento de 20 a 40 dias de CDD no sul e sul-centro do estado, dependendo do cenário;
- ✓ Elevação de até +6 °C na temperatura média em determinadas regiões costeiras até os anos 2080 (sob SSP5-8.5).

Simultaneamente, projeta-se uma redução significativa na precipitação anual, com redução de até 1.000 mm em áreas de maior vulnerabilidade,

intensificando a aridez e os impactos sobre a agricultura e ecossistemas hídricos regionais (dados previstos pelo Instituto de Estudos Climáticos da UFES).

➤ Impactos e contexto

Esses dados evidenciam um quadro climático em rápida transformação no Espírito Santo, com:

- ✓ Ampliação de estresses térmicos para culturas sensíveis como o café;
- ✓ Intensificação da vulnerabilidade dos ecossistemas costeiros, especialmente manguezais, que exercem serviços ecossistêmicos cruciais;
- ✓ Aumento de impactos socioeconômicos sobre comunidades tradicionais, pescadores artesanais e pequenos produtores agrícolas.

Diante desse cenário, torna-se urgente implementar políticas públicas integradas que promovam:

- ✓ Monitoramento climático contínuo;
- ✓ Conservação e restauração de ecossistemas costeiros;
- ✓ Extensão técnica e apoio à agricultura adaptativa;
- ✓ Engajamento da sociedade civil na promoção da resiliência e da sustentabilidade ambiental no Espírito Santo.

5. Proliferação de Pragas e Doenças

A temperatura é um fator determinante para o desenvolvimento e a dinâmica populacional dos insetos-praga, influenciando diretamente o consumo de alimento, o crescimento, a mobilidade e a reprodução desses organismos (Yuan *et al.*, 2024). As flutuações térmicas decorrentes das mudanças climáticas têm potencializado o aumento das populações de pragas, bem como a expansão de suas áreas geográficas, o que acarreta perdas significativas na produção agrícola.

Singh *et al.* (2023) evidenciam que as alterações climáticas intensificaram tanto a frequência quanto a severidade das infestações por pragas e doenças, além de promover a dispersão de agentes patogênicos para regiões antes não afetadas, criando novos desafios para o manejo agrícola sustentável.

Embora as plantas possuam mecanismos naturais de resistência e adaptação, variações abruptas e anômalas de temperatura e disponibilidade hídrica aumentam sua vulnerabilidade, dificultando o controle fitossanitário. No caso do cafeeiro (*Coffea arabica*), doenças fúngicas e ataques de pragas têm se tornado mais frequentes, estendendo-se para altitudes e regiões que anteriormente ofereciam condições menos favoráveis para sua ocorrência (Parada-Molina *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2022).

Os fungos fitopatogênicos geralmente apresentam uma faixa térmica mais ampla de sobrevivência do que a planta hospedeira, que se desenvolve melhor em temperaturas entre 18°C e 21°C. Por isso, essas doenças tendem a ser menos afetadas pelas mudanças climáticas do que o próprio cafeeiro, podendo, inclusive, expandir sua incidência com o aumento da temperatura e alteração dos regimes pluviométricos (DaMatta *et al.*, 2007; Ruiz *et al.*, 2013; Parada-Molina *et al.*, 2020).

Além disso, o aumento da temperatura e a intensificação de eventos extremos — como períodos prolongados de umidade elevada seguidos de chuvas intermitentes — favorecem a propagação de doenças fúngicas em regiões quentes e úmidas, o que pode comprometer a adequação de áreas atualmente consideradas ideais para a cultura do café (Parada-Molina *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2023).

Entre as principais doenças fúngicas que afetam o cafeeiro, destacam-se:

- ✓ **Ferrugem alaranjada (*Hemileia vastatrix*):** doença que ataca as folhas e pode reduzir a produtividade em até 30% se não controlada. Desenvolve-se em ambientes úmidos e quentes, sendo favorecida por temperaturas entre 25°C e 28°C, umidade noturna acima de 90% e chuvas leves constantes por 20 a 30 dias (Parada-Molina *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2022).

- ✓ **Mancha-de-ferro (*Cercospora coffeicola*):** manifesta-se por manchas necróticas circulares que causam desfolha e comprometem o crescimento, ocorrendo em temperaturas entre 15°C e 30°C e alta umidade (Barguil *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2023).
- ✓ **Antracnose (*Colletotrichum coffeanum*):** disseminada principalmente durante a estação chuvosa, provoca manchas necróticas em folhas, flores e frutos, levando à queda prematura do fruto (Parada-Molina *et al.*, 2020).
- ✓ **Olho-de-galo (*Mycena citricolor*):** comum em condições úmidas e temperaturas amenas, afeta folhas e frutos, resultando também na queda destes (Oliveira *et al.*, 2023).

6. Perda de fertilidade do solo

A erosão hídrica constitui uma das principais formas de degradação do solo em regiões tropicais, comprometendo sua estrutura e capacidade produtiva (Carvalho *et al.*, 2007). Esse processo remove sedimentos, carbono orgânico, nutrientes essenciais e água por meio do escoamento superficial, elementos fundamentais para a produtividade agrícola e o equilíbrio ecológico do solo (Wang *et al.*, 2021). Como consequência, ocorre a redução das áreas agricultáveis, a perda da fertilidade do solo e a diminuição da produtividade agrícola, o que representa um risco crescente à segurança alimentar global e à sustentabilidade dos ecossistemas terrestres.

Os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destacam que o aumento das temperaturas globais está associado à maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, incluindo precipitações intensas (IPCC, 2023). Esse aumento na intensidade pluviométrica eleva o volume do escoamento superficial, potencializando a erosão hídrica e as perdas de solo e nutrientes por transporte, acelerando a degradação dos sistemas agrícolas.

Estudos recentes enfatizam o impacto da erosão na perda de nutrientes em áreas cultivadas com café. Atanaw, Zimale e Ayenew (2025) mensuraram uma produção de sedimentos que variou de 54 a 186,5 t·ha⁻¹·ano⁻¹ em uma bacia

hidrográfica da Etiópia, indicando o potencial severo de erosão em regiões tropicais.

No Espírito Santo, Souza *et al.* (2025) avaliaram a perda de nutrientes do solo em áreas cultivadas com café, após eventos pluviométricos na região de Itapina, município de Colatina. Os resultados demonstraram que áreas com solo exposto apresentaram perdas muito superiores de sedimentos e nutrientes em comparação às áreas manejadas com plantas de cobertura, conforme mostra a Tabela 4.

Manejo do Solo	Sedimento (kg/ha)					Escoamento Superficial (kg/ha)		
	Corgânico	P	K	Ca	Mg	N	P	K
	Setembro/ 2021 – Março/ 2022							
Solo Exposto	890	3,90	20,48	76,2	18,03	27,5	0,58	107,3
Planta de Cobertura 1	140	0,50	2,50	10.1	2.61	33.0	0.45	61.6
Planta de Cobertura 2	141	0,50	4,07	11.0	3.20	21.7	0.32	60.2
	Setembro/ 2022 – Dezembro/ 2022							
Solo Exposto	347	1.03	5.29	25.5	5.30	16.5	0.52	52.2
Planta de Cobertura 1	122	0.43	1.82	9.3	1.69	11.1	0.46	53.4
Planta de Cobertura 2	102	0.47	0.98	8.8	1.18	7.5	0.40	35.2

Fonte: Souza *et al.*, 2025.

7. Contribuição de práticas agroecológicas para a cafeicultura em cenário de mudanças climáticas

A adoção de práticas agroecológicas e regenerativas na cafeicultura tem se mostrado uma estratégia essencial frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Essas práticas promovem a resiliência dos

agroecossistemas, aumentam a fertilidade do solo, favorecem a biodiversidade e reduzem a dependência de insumos externos, contribuindo para mitigar os efeitos das alterações climáticas e garantir a sustentabilidade da produção cafeeira em longo prazo.

Segundo Altieri *et al.* (2022), os sistemas agroecológicos, por integrarem princípios ecológicos no manejo agrícola, são capazes de conservar recursos naturais e fortalecer os mecanismos naturais de adaptação, tornando a agricultura mais resistente a estresses ambientais como secas e ondas de calor. Já Gatti *et al.* (2021) destacam que a regeneração do solo por meio de práticas como a adubação verde, o consórcio de culturas e a cobertura permanente do solo é fundamental para aumentar o sequestro de carbono, melhorar a retenção hídrica e reduzir a emissão de gases de efeito estufa.

Além disso, estudos recentes têm demonstrado que a implementação de Sistemas Agroflorestais (SAFs) na cafeicultura é uma alternativa viável e eficiente, pois associa a produção agrícola à conservação ambiental. Para Tiftonell *et al.* (2023), os SAFs oferecem microclimas favoráveis, promovem a ciclagem de nutrientes e favorecem uma maior estabilidade ecológica nas lavouras de café, sendo recomendados como uma das principais estratégias de adaptação às mudanças climáticas nos trópicos.

Portanto, práticas agroecológicas e regenerativas representam não apenas uma alternativa viável, mas uma necessidade para a cafeicultura diante das mudanças climáticas. Elas contribuem para a construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis, produtivos e socialmente justos, promovendo segurança alimentar e conservação ambiental.

8. Considerações

As mudanças climáticas configuram um desafio crescente e multifacetado para a cafeicultura no Espírito Santo, impactando não apenas a produtividade, mas também a qualidade dos grãos, a sustentabilidade socioeconômica das comunidades envolvidas e a preservação ambiental das regiões cafeeiras. A intensificação dos eventos climáticos extremos, a elevação das temperaturas e

as alterações nos padrões pluviométricos exigem respostas rápidas e eficazes para garantir a continuidade dessa importante atividade econômica e cultural.

Neste contexto, a adoção de estratégias proativas de mitigação e adaptação torna-se fundamental. Práticas agrícolas inovadoras e sustentáveis, como o uso de sistemas agroflorestais, manejo conservacionista do solo, diversificação de cultivares adaptados a condições climáticas variáveis, e o monitoramento contínuo de pragas e doenças, são ferramentas essenciais para aumentar a resiliência das lavouras e minimizar os impactos adversos.

Este estudo fornece subsídios técnicos e científicos relevantes para a formulação de políticas públicas que apoiem a implementação dessas práticas, fortalecendo a capacidade de resposta do setor frente às adversidades climáticas. Além disso, destaca a importância da integração entre produtores, pesquisadores, órgãos governamentais e instituições de ensino para o desenvolvimento de soluções regionais eficazes e contextualizadas.

Ademais, enfatiza-se a necessidade de investimentos em tecnologias de sensoriamento remoto e modelagem climática, que permitam o mapeamento preciso das áreas vulneráveis e a antecipação de riscos, facilitando a tomada de decisões estratégicas e a adoção de manejos personalizados conforme as especificidades locais.

Por fim, ressalta-se que a sustentabilidade da cafeicultura capixaba depende não apenas da adaptação às mudanças ambientais, mas também do fortalecimento das dimensões social e econômica da produção. Incentivar a capacitação dos agricultores, promover o acesso a mercados diferenciados e fomentar práticas que valorizem a biodiversidade são aspectos cruciais para assegurar um futuro resiliente e sustentável para o café do Espírito Santo e para as comunidades que dele dependem.

8. Referências

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I.; HENAO, A. Agroecologia e resiliência climática: construindo sistemas alimentares sustentáveis e adaptáveis. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 46, n. 2, p. 123-140, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/21683565.2021.1940567>.

ASSAD, E. D., PINTO, H. S., ZULLO JUNIOR, J., & ÁVILA, A. M. H. (2004). Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 39, 1057-1064.

ATANAW, S. B.; ZIMALE, F. A.; AYENEW, T. Assessment of erosion, sediment yield, and runoff generating areas in Dirima catchment, upper Blue Nile, Tana Basin, Ethiopia. **Sustainable Water Resources Management**, v. 11, n. 1, p. 2, 11 fev. 2025.

BARBOSA, J. N. *et al.* Climate change and coffee quality: Systematic review and perspectives. **Agronomy**, v. 10, n. 10, p. 1-20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10101559>.

BARGUIL, C. *et al.* Controle da cercosporiose em café utilizando produtos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 4, p. 610-615, 2005.

BIEMONT, E.; RODRIGUES, A. C.; VIANA, A. P.; RODRIGUES, S. The effect of drought stress on coffee bean quality. **Food Chemistry**, v. 197, p. 1118-1124, 2016.

BUNN, C. *et al.* A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic Change**, v. 170, p. 1-19, 2021. DOI: 10.1007/s10584-021-03260-0.

CALVIN, K. *et al.* **IPCC, 2023: Climate Change 2023 - Synthesis Report, Summary for Policymakers.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias *et al.*, Eds.). [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Acesso em: 13 abr. 2025.

CAMARGO, M. B. P.; CAMARGO, A. P. Definição das faixas térmicas para o cultivo de café arábica no Brasil. **Bragantia**, v. 80, p. 450-460, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200627>

CARVALHO, R. *et al.* Erosão hídrica em Latossolo Vermelho sob diversos sistemas de manejo do cafeeiro no Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1475-1482, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400037>.

CÉSAR PARADA-MOLINA, P. *et al.* **Hemileia vastatrix**: una prospección ante el cambio climático *Hemileia vastatrix*: a climate change prospect Nota científica. [s.d.].

COHEN, M. J. *et al.* Climate Change and Agriculture: Impacts and Adaptation. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 38, p. 283-307, 2013. DOI: 10.1146/annurev-environ-012312-110923.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café: Safra 2023 – Primeiro levantamento**. Brasília: CONAB, 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Safra 2020. Terceiro Levantamento Setembro 2020, v. 6, n. 3. p. 1-54. 2020. **Acompanhamento da safra brasileira**. Disponível em: www.conab.com.br. Acesso em: 12 jan. 2021.

DAMATTA, F. M. *et al.* Impact of temperature on coffee physiology and disease incidence. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 3, p. 229-242, 2007.

GATTI, L. V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, p. 388–393, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.

GEBRE, T. *et al.* Climate change, coffee livelihoods and migration: evidence from Ethiopia. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 4, 2023. DOI: 10.1088/1748-9326/acc1f4.

GRÜTER, R.; TRACHSEL, T.; LAUBE, P.; JAISLI, I. **Expected global suitability of coffee, cashew and avocado due to climate change**. PloS one, v. 17, n. 1, p. e0261976, 2022.

INCAPER. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Boletim Agroclimático Trimestral – Julho a Setembro 2023**. Vitória: Incaper, 2023.

INCAPER. Instituto Capixaba De Pesquisa, Assistência Técnica E Extensão Rural. **Boletim-agroclimatico-ES-v10-n.3-jul-set-2023**. Disponível em: <<https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/4495/1/Boletim-agroclimatico-ES-v10-n.3-jul-set-2023.pdf>>. Acesso: 10 nov. 2023.

INSTITUTO DE ESTUDOS CLIMÁTICOS – UFES. **Projeções de mudanças climáticas para o Espírito Santo: modelagem regional CMIP6** (temperatura e precipitação). Vitória, 2024.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Sexto Relatório de Avaliação** – AR6: Sumário para formuladores de políticas. Genebra: IPCC, 2023.

LÄDERACH, P. *et al.* Climate adaptation strategies in coffee production: a global overview. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 43, p. 25, 2023. DOI: 10.1007/s13593-023-00849-7.

LOPES, A. L.; OLIVEIRA, F. S. de. Percepções e representações sociais sobre a degradação dos manguezais de Vitória/ES. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 1-10, 2020.

MULLER, N.; RICK, C.; GERDTS, K.; HARVEY, K. Impact of climate change on coffee production in Colombia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 211, p. 150-167, 2015.

MÚNERA-ROLDÁN, L. S. *et al.* Water deficit in *Coffea arabica* during flowering and bean filling: impacts on yield and quality. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106373, 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106373.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. Mauna Loa Observatory, 2023. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Acesso em: 04 ago. 2025.

OGUNDEJI, A. A. *et al.* Climate change and the future of coffee production in Africa: A review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 30, p. 1329–1341, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2019.14108>

OGUNDEJI, B. A. *et al.* Climate Hazards and the Changing World of Coffee Pests and Diseases in Sub-Saharan Africa. **Journal of Experimental Agriculture International**, p. 1-12, 2019.

OLIVEIRA, F. A. *et al.* Climate change impacts on coffee diseases and integrated pest management. **Crop Protection**, v. 158, 105951, 2023. DOI: 10.1016/j.cropro.2021.105951.

OLIVEIRA, G. P. *et al.* Drought stress in *Coffea arabica*: implications for bean quality and secondary metabolism. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 71, n. 6, p. 2154-2162, 2023. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c07514.

OVALLE-RIVERA, O. *et al.* Projected shifts in *Coffea arabica* suitability due to climate change and implications for pest and disease pressure. **Agricultural Systems**, v. 195, p. 103293, 2022. DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103293.

PARADA-MOLINA, R. *et al.* Coffee diseases under climate change scenarios: a review. **Plant Pathology**, v. 69, n. 4, p. 622-635, 2020.

PINHO, R. G. V. *et al.* Impactos do aumento da temperatura sobre a produtividade de culturas agrícolas no Brasil. **Revista Brasileira de**

Climatologia, v. 29, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v29i0.74832>

PRADO TANURE, M. C. **Biomass brasileiros**: impactos das mudanças climáticas na biodiversidade e nos regimes hidrológicos. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2020.

PRADO TANURE, M. L. Variações climáticas e seus efeitos sobre a produção agrícola no Brasil. **Revista Geonorte**, v. 11, n. 40, p. 215-234, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21170/geonorte.v11i40.12345>.

PRADO TANURE, T. M. do. **Mudanças climáticas e agrícolas no Brasil**: impactos econômicos regionais e por cultivo familiar e patronal. 2020.

REYES, M. et al. Socioeconomic impacts of climate change on coffee production in Ethiopia. **World Development**, v. 93, p. 178-192, 2021.

ROCHA PINHO, L. G. da; BITENCOUT, L. L.; SOUZA, G. S. de; LEAL, É. D. A. S.; SOUZA LINO, L. de; ALVES, A. G.; ELIAS, J. Mudanças climáticas e a produção de café conilon na microrregião centro-oeste do estado do Espírito Santo. **Revista Ifes Ciência**, v. 7, n. 1, p. 01-14, 2021.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* Safe and just Earth system boundaries. **Nature**, v. 619, p. 521-528, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>.

RODRIGUES, W. N. et al. Produção de café e mudanças climáticas: Diagnóstico e estratégias de mitigação. **Revista Agroecossistemas**, v. 13, n. 2, p. 45–59, 2021.

RUÍZ, D. P. *et al.* Temperature and humidity effects on coffee rust infection and disease development. **Phytopathology**, v. 103, n. 5, p. 441-451, 2013.

SANCHES, F. H. C.; CHRISTOFOLETTI, R. **Espírito Santo lidera o aumento expressivo de extremos de temperatura na costa brasileira em 40 anos**. Scientific Reports, 2023. Disponível em: Folha do ES. Acesso em: 04 ago. 2025. Universidade Federal do Espírito Santo+2Universidade Federal do Espírito Santo+2Blog da UFES+2agencia.fapesp.br+2FOLHA DO ES+2Unifesp+2.

SANCHES, F. H. ; MARTINS, F. R. ; CONTI, W. R. ; CHRISTOFOLETTI, R. A. The increase in intensity and frequency of surface air temperature extremes throughout the western South Atlantic coast. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 6293, 2023.

SCOPUS. **Base de dados bibliográfica da Elsevier**. Disponível em: <https://www.scopus.com>. Acesso em: 04 ago. 2025.

SILVA, A. A.; PINTO, H. S. Estratégias adaptativas da cafeicultura frente às mudanças climáticas no Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 17, n. 2, p. 105–117, 2023. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v17n200123>.

SILVA, M. A. *et al.* Recent trends in coffee disease outbreaks in Brazil and climatic drivers. **Plant Disease**, v. 106, n. 2, p. 402-410, 2022.

SINGH, B. K. *et al.* Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. **Nature Reviews Microbiology**, v. 21, n. 10, p. 640-656, 2023.

SINGH, R. *et al.* Climate change effects on pest and pathogen dynamics in agriculture. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 25, n. 1, p. 12-28, 2023.

SOUZA, G. S. De *et al.* Cover crops in between-rows of Coffea canephora for reduction of soil erosion. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 49, 2025.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; SILVA JUNIOR, A. G.; GRIFFITH, J. J.; DELGADO, R. C. Uso da modelagem para avaliação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas em cenários de mudanças climáticas: o caso do ribeirão Entre Ribeiros, afluente do rio Paracatu. **Diário Oficial da União. Seção 3 (Online)**. , v. 3, p. 234-245, 2010.

TANURE, T. M. do P. **Mudanças climáticas e agricultura no Brasil: impactos econômicos regionais e por cultivo familiar e patronal.** [s.l: s.n.].

TITTONELL, P. *et al.* Scaling agroecology: from field to territory. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 43, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00869-2>.

UFES. Universidade Federal do Espírito Santo. **Pesquisa do PELD/ES registra morte de 500 ha de manguezais em 2016 por seca e tempestade de granizo.** Vitória, 2025. Universidade Federal do Espírito Santo+2Universidade Federal do Espírito Santo+2Universidade Federal do Espírito Santo+2

UFES. Universidade Federal do Espírito Santo. **Pesquisa mostra que mudanças climáticas ameaçam a zona costeira do Espírito Santo.** 11 de abril de 2022. Disponível em: <https://www.ufes.br/conteudo/pesquisa-mostra-que-mudancas-climaticas-ameacam-zona-costeira-do-espírito-santo>.

UFES. **Projeções de Mudanças Climáticas para o Espírito Santo Utilizando Modelagem Regional de Alta Resolução.** 2013. Disponível em: Projeções de Mudanças Climáticas para o Espírito Santo Utilizando Modelagem Regional de Alta Resolução | Instituto de Estudos Climáticos (ufes.br)

VERDINASSI, M. *et al.* Climate change impacts on coffee crop in Brazil: A systematic review. **Agricultural Systems**, v. 194, p. 103275, 2021. DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103275.

WMO. World Meteorological Organization. **State of the Global Climate 2023.** Geneva: WMO, 2023. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/resources/library>. Acesso em: 04 ago. 2025.

YUAN, S. *et al.* Temperature impacts on insect pest development and crop losses. **Journal of Agricultural Science**, v. 162, n. 1, p. 34-45, 2024.

YUAN, W. *et al.* Climate change impacts on crop yield and food security: A global synthesis. **Global Environmental Change**, v. 85, 2024. DOI: 10.1016/j.gloenvcha. 2024.103185.

YUAN, X. *et al.* **Impacts of global climate change on agricultural production: a comprehensive review.** **Agronomy** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 1 jul. 2024.

ZULUAGA, M. Y. A. *et al.* Potential shifts in coffee-growing areas under climate change in Brazil. **Climatic Change**, v. 170, p. 15, 2022. DOI: 10.1007/s10584-021-03297-6.