



PEDRO ROCHA SANTOS

**CONHECENDO A INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE FORRAGEIRAS**

LAVRAS - MG

2025

PEDRO ROCHA SANTOS

**CONHECENDO A INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO
DE FORRAGEIRAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia da Produção Animal, área de concentração Produção Animal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Márcio André Stefanelli Lara
Orientador

LAVRAS - MG
2025

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Santos, Pedro Rocha.

Conhecendo a influência das mudanças climáticas na produção
de forrageiras / Pedro Rocha Santos. - 2025.

50 p. : il.

Orientador(a): Márcio André Stefanelli Lara.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Mudanças Climáticas. 2. Produção de Forrageiras. 3.
Sustentabilidade. I. Lara, Márcio André Stefanelli. II. Título.

PEDRO ROCHA SANTOS

**CONHECENDO A INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO
DE FORRAGEIRAS**

**KNOWING THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON FORAGE
PRODUCTION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia da Produção Animal, área de concentração Produção Animal, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovado em 05 de dezembro de 2024
Dr. MARCIO ANDRE STEFANELLI LARA
Dr. DANIEL RUME CASAGRANDE
Dr. BRUNO GROSSI COSTA HOMEM

Prof. Dr. Márcio André Stefanelli Lara
Orientador

Lavras - MG

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela por me abençoar com saúde e me capacitar para enfrentar os desafios da vida.

À minha esposa Rafaela pelo apoio, carinho e principalmente por compreender os momentos de minha ausência.

Aos meus colegas de turma, que tornaram esta jornada mais leve e enriquecedora, além de todo o companheirismo e incentivo.

Agradeço também ao Projeto Rural Sustentável – Cerrado, que junto da Universidade Federal de Lavras – UFLA, viabilizaram este Mestrado Profissional. Projeto que é financiado pela Cooperação Técnica aprovada pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), com recursos do Financiamento Internacional do Clima do Governo do Reino Unido, tendo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como beneficiário institucional.

Também agradeço ao Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) que é o responsável pela execução e administração do projeto.

Por fim, agradeço também ao professor Dr. Marcio André Stefanelli Lara, pela dedicação ao me orientar neste trabalho, além de todo o incentivo ao longo destes dois anos.

RESUMO

As mudanças climáticas impactam diretamente na fauna e flora do planeta. A alteração nos padrões de temperatura, precipitação, disponibilidade de água e concentração de CO₂ podem trazer grandes mudanças para a agricultura em geral. Plantas com metabolismo fotossintético C3 e C4, tendem a responder de forma diferente as alterações dos fatores ambientais, portanto, a escolha da espécie adequada aos fatores abióticos de determinada região é essencial para o alcance de altas produtividades. Para a forragicultura, isto não é diferente, forrageiras C3, em geral, são mais adaptadas para climas mais amenos enquanto as de metabolismo C4, são mais adaptadas para condições de clima tropical. Diante deste cenário, objetivou-se analisar quais estudos estão sendo desenvolvidos sobre a influência das mudanças climáticas na produção de plantas forrageiras e avaliar os impactos das mudanças climáticas, em especial dos fatores temperatura média, precipitação, disponibilidade de água e concentração de CO₂, na produtividade de forrageiras C3 e C4. Foi realizada um levantamento de informações baseada em material publicado nas bases de dados: Google Acadêmico, Scopus, SciELO, BASE e BDTD utilizando as palavras-chaves "mudanças climáticas", "forrageiras", "produção de pastagens", "impactos climáticos", e "climate change", "forrage", "pasture production" e "climate impacts". Os fatores que mais impactam a produção de forragem (água, temperatura e Concentração de CO₂) foram tabulados e transformados em valores nominais e em percentuais, e submetidos a uma análise exploratória e descritiva dos dados e em seguida foi realizada a análise da árvore de decisão construídos através de pacotes do programa estatístico R. Tanto para as plantas C3, quanto para as C4, o fator "água", seja na redução de precipitação ou de disponibilidade de água, levaram a uma redução da produção de matéria seca em até 25%, e e na produtividade primaria líquida (NPP) de até 11%, enquanto a elevação de temperatura e de concentração de CO₂, isolados ou simultaneamente, resultaram em incremento da produção de matéria seca de até 119% e 42% respectivamente. Portanto, segundo as perspectivas de alterações para as próximas décadas, a redução de precipitação e disponibilidade de água tendem reduzir as produtividades das forrageiras, enquanto o aumento de temperatura média e de concentração de CO₂ tendem a elevar as produtividades de forrageiras.

Palavras-chaves: mudanças climáticas; produção de forrageiras; agropecuária; sustentabilidade.

ABSTRACT

Climate change directly impacts the planet's fauna and flora. Alterations in temperature patterns, precipitation, water availability, and CO₂ concentration can lead to significant changes in agriculture. Plants with C3 and C4 photosynthetic metabolisms tend to respond differently to shifts in environmental factors. Therefore, selecting species that are best suited to the abiotic conditions of a specific region is crucial for achieving high productivity. For forage production, the scenario is no different. C3 forage species are generally better adapted to temperate climates, whereas C4 species thrive in tropical conditions. In light of this, the study aimed to analyze ongoing research on the influence of climate change on forage plant production and evaluate the impacts of climate change—particularly in terms of average temperature, precipitation, water availability, and CO₂ concentration—on the productivity of C3 and C4 forage species. A literature review was conducted using databases such as Google Scholar, Scopus, SciELO, BASE, and BDTD. Keywords included "climate change," "forage," "pasture production," "climate impacts," as well as their equivalents in Portuguese. The factors most affecting forage production—water availability, temperature, and CO₂ concentration—were tabulated, converted into nominal and percentage values, and subjected to exploratory and descriptive data analysis. A decision tree analysis was then performed using statistical packages in the R software. For both C3 and C4 plants, the factor "water," whether in reduced precipitation or decreased availability, led to a reduction in dry matter production by up to 25% and in net primary productivity (NPP) by up to 11%. Conversely, increased temperature and CO₂ concentration, either independently or simultaneously, resulted in gains in dry matter production of up to 119% and 42%, respectively. Thus, considering projected climate changes over the coming decades, reduced precipitation and water availability are expected to decrease forage productivity. Meanwhile, rising average temperatures and CO₂ concentration are likely to enhance productivity.

Keywords: climate change; forage production; agriculture; sustainability.

INDICADORES DE IMPACTO

Esta dissertação investigou quais os estudos estão sendo desenvolvidos sobre influência das mudanças climáticas na produção de forrageiras, avaliou os impactos das mudanças climáticas, em especial dos fatores temperatura, precipitação, disponibilidade de água e concentração de CO₂, na produtividade de forrageiras C3 e C4; examinou o efeito das mudanças climáticas na qualidade da plantas forrageiras; também destacou lacunas no conhecimento atual e sugeriu direções para pesquisas futuras, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas. Diante disso, foi encontrado que tanto para plantas C3, quanto C4, o fator ambiental relacionado a água disponível para as plantas, será decisivo, visto que a redução leva ao decréscimo de produtividade, enquanto as tendências de aumento de temperatura média e de concentração de CO₂ tendem a elevar a produtividade de forrageiras, quando sob condições hídricas adequadas. Levando em consideração que a sustentabilidade não pode ser alcançada sem uma compreensão aprofundada das interações ecológicas e climáticas, prever como as plantas forrageiras responderão aos cenários futuros será importante para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação, se alinhando intimamente com o ODS 2 – Fome zero e agricultura sustentável. Além disso, buscou-se investigar sobre o que tem se estudado sobre estas estratégias de mitigação, adaptação e também sobre as políticas públicas brasileiras relacionadas a sustentabilidade, desta vez buscando o alinhamento com os ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima e 17 - Parcerias e meios de implementação.

IMPACT INDICATORS

This dissertation investigated the studies currently being developed on the influence of climate change on forage production. It evaluated the impacts of climate change, particularly factors such as temperature, precipitation, water availability, and CO₂ concentration on the productivity of C3 and C4 forage species. Additionally, it examined the effects of climate change on forage quality, identified gaps in current knowledge, and suggested directions for future research, contributing to the development of adaptation and mitigation strategies to address the challenges posed by climate change. The findings indicate that, for both C3 and C4 plants, the environmental factor related to water availability will be decisive. A reduction in water availability leads to a decline in productivity, while trends of increasing average temperature and CO₂ concentration tend to boost forage productivity under adequate water conditions. Considering that sustainability cannot be achieved without a deep understanding of ecological and climatic interactions, predicting how forage plants will respond to future scenarios will be crucial for developing adaptation and mitigation strategies. This aligns closely with SDG 2 – Zero Hunger and Sustainable Agriculture. Furthermore, the dissertation explored existing studies on mitigation and adaptation strategies as well as Brazilian public policies related to sustainability, seeking alignment with SDG 13 – Climate Action and SDG 17 – Partnerships for the Goals.

LISTA DE ABREVEATURA

ABC	Agricultura de Baixa Emissão de Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FDN	Fibra solúvel em detergente neutro
FDA	Fibra solúvel em detergente ácido
GEE	Gases de efeito estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ILPF	Lavoura-pecuária-floresta
MIP	Manejo Integrado de Pragas
MODERAGRO	Modernização da Agricultura e Conservação dos Recursos Naturais
NO ₂	Óxido de nitrogênio
PRONAF	Programa de Fortalecimento da Agricultura Familiar
SENAR	Serviço Nacional de Aprendizagem Rural

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1. A- Material de literatura filtrada nas referências utilizadas; B- Clima onde cada estudo foi realizado nas referências utilizadas; C- Tipo de metabolismo das plantas nas referências utilizadas; D- Abordagem do estudo nas referências utilizadas. Fonte: do Autor (2024).....	32
Figura 2 Fatores estudados nas principais pesquisas com mudanças climáticas na produção forrageira. Fonte: Autor (2024).....	33
Figura 3. Árvore de decisão referente ao fichamento desmembrado das plantas C3. Resultado de incremento de produtividade de matéria seca (MS) (%). Fonte: Autor (2024)	34
Figura 4 Árvore de decisão referente ao fichamento desmembrado das plantas C4. Resultado de incremento de matéria seca (MS) (%). Fonte: Autor (2024)	35
Figura 5 Árvore de decisão para as plantas C3 em incremento de Produtividade Primária Líquida por hectare. Fonte: Autor (2024)	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
3 HIPÓTESES	12
4 REFERÊNCIAL TEÓRICO	13
4.1 Produção de forragem e mudanças climáticas	13
4.2 Plantas C3 e as mudanças climáticas.....	16
4.3 Plantas C4 e as mudanças climáticas.....	18
4.4 Bioma Cerrado e a produção de forragem	19
4.5 Fatores ambientais na produção de forragem	20
4.6 Mudanças climáticas: histórico, panorama atual e perspectivas futuras.....	22
4.7 Impactos na Fenologia e Crescimento das Forrageiras	24
4.8 Alterações na Composição e Qualidade Nutricional	25
4.9 Adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas	25
4.10 Técnicas de Manejo Sustentável	27
4.11 Políticas Públicas e Iniciativas Governamentais	28
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
6 RESULTADOS.....	31
7 DISCUSSÃO	37
8 CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

A pauta das mudanças climáticas está cada dia mais presente nos meios de comunicação, este termo refere-se a qualquer mudança sobre os fatores do clima, podendo ser um fenômeno natural ou influenciado pela humanidade. Esta última tem se tornado um dos maiores desafios enfrentados no século XXI, tendo em vista que nas últimas décadas essas mudanças climáticas estão ocorrendo de forma mais acelerada. Desde 1880, período pré-industrial, a temperatura média da superfície do planeta tem aumentado a uma taxa média de 0,08°C a 0,09°C por década, enquanto a partir da década de 1980, a taxa mais que dobrou, passando para uma média de 0,19°C a 0,20°C de aumento por década (DUNN *et al.*, 2022).

A aceleração das mudanças climáticas é um grande risco para todos os seres vivos, sejam da fauna ou da flora, já que muitas vezes a capacidade de adaptação destes, não consegue acompanhar a velocidade de mudanças climáticas, podendo trazer prejuízos sociais, ambientais e econômicos. Para a agricultura e a pecuária, estes riscos não são diferentes, levando em consideração que os fatores de produção ambientais são difíceis de se controlar ou gasta-se muito recurso para tal. Dentre estes fatores, estão principalmente as alterações dos padrões de temperatura, de disponibilidade de água, de concentração de CO₂ atmosférico, de alteração do regime de chuvas e dos eventos climáticos extremos (PELLEGRINO *et al.*, 2007).

Estes riscos são preocupantes tanto para as regiões de clima tropical, quanto para as de clima temperado. Nas regiões tropicais, pela característica de sazonalidade das chuvas, predominam-se as pastagens cultivadas com gramíneas forrageiras adaptadas, em especial plantas dos gêneros *Brachiaria* spp. syn. *Uroclhoa* e *Panicum* spp. syn. *Megathyrsus* (BOURLIÈRE; HADLEY, 1983), que são caracterizadas como plantas C4 e possuem maior eficiência na conversão de CO₂ em açúcares durante o processo de fotossíntese, essa característica se destaca principalmente em condições de estresse, tornando estas espécies adaptadas ao clima da região e se caracterizando pelo alto potencial produtivo (DOS ANJOS; DA SILVA, 2023; BRANDSTETTER *et al.*, 2019).

Já para as regiões de clima temperado, as forrageiras que melhor se adaptam são as chamadas de metabolismo fotossintético C3, como é o caso da Alfafa (*Medicago sativa* L.), Aveia (*Avena sativa* L.) e Trevo (*Trifolium repens* L.). Estas forrageiras possuem como característica, melhor desenvolvimento em condições de temperaturas amenas, e menor eficiência na conversão de CO₂ em açúcares durante o processo de fotossíntese, tendo em vista que, em condição de estresse, elas realizam o processo de fotorrespiração, onde em condições

de concentração de oxigênio maior que dióxido de carbono, ocorre a perda de um carbono já fixado, desperdício de energia e diminuição na síntese de açúcares (TAIZ; ZIEGER, 2013).

Porém, apesar da adaptabilidade destas forrageiras em cada região, o equilíbrio entre a espécie e as condições ambientais é de grande importância para o alcance de níveis aceitáveis em qualidade e quantidade de forragem produzida, tanto na estação chuvosa, quanto na seca (PEDREIRA; TONATO, 2006). Pelas questões fisiológicas expostas anteriormente, diferentes espécies de forrageiras podem responder de forma diferente a cada um dos fatores ambientais a qual estão inseridas e pelo efeito das mudanças climáticas.

Diante deste cenário, entender como as mudanças climáticas influenciam e influenciarão a produção das forrageiras é imprescindível para o sucesso da pecuária e a segurança alimentar do Brasil e do mundo a curto, médio e longo prazo.

2 OBJETIVOS

Objetivou-se com este trabalho analisar quais estudos estão sendo desenvolvidos sobre a influência das mudanças climáticas na produção de forrageiras;

Definir os impactos das mudanças climáticas, em especial dos fatores temperatura média, precipitação, disponibilidade de água e concentração de CO₂, na produtividade de forrageiras C3 e C4;

Investigar as políticas públicas e iniciativas governamentais voltadas para a sustentabilidade da produção de forrageiras frente às mudanças climáticas;

Identificar e discutir as estratégias de adaptação utilizadas pelos produtores rurais para mitigar os efeitos das mudanças climáticas na produção de forrageiras.

3 HIPÓTESES

As mudanças climáticas implicarão em impactos na produtividade de forrageiras, com maiores impactos para as plantas C3, do que para as plantas C4.

Fatores ambientais isolados não são suficientes para definir qual o impacto sobre a produção de forragem.

4 REFERÊNCIAL TEÓRICO

4.1 Produção de forragem e mudanças climáticas

As mudanças climáticas dizem respeito a mudanças significativas e persistentes nos padrões meteorológicos e climáticos da Terra, estas são influenciadas tanto por processos naturais quanto pela atividade humana. Essas transformações englobam flutuações na temperatura média, alterações quanto a distribuição e intensidade de precipitação, aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos e o aumento do nível dos oceanos (GUINCHO, 2021).

As atividades dos seres humanos na Terra como a queima de combustíveis fósseis, práticas agrícolas e industriais, aumentam a emissão dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Estes gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), e óxido nitroso (NO₂), atuam retendo o calor atmosférico sobre a superfície da terra criando o conhecido efeito estufa. Embora essencial para a vida, em excesso, acaba elevando a temperatura da superfície terrestre, causando impactos negativos para a vida no planeta (FRANCISCO, 2018).

As alterações climáticas devem ser combatidas com seriedade, visto que seus efeitos afetam não somente a vida humana, mas de todos os seres vivos. Alterações nos padrões de chuva podem levar a falta de água potável para dessedentação de pessoas e animais, falta de água para irrigação de lavouras, além de serem precursoras de eventos climáticos extremos, como secas severas, inundações, geadas, tornados, degelo de calotas polares, elevação do nível dos oceanos e muitos outros (IPCC, 2023).

Quando se trata das plantas forrageiras, variações de temperatura e nos padrões de chuva podem impactar o desenvolvimento, qualidade e oferta dessas plantas (PIEADADE et al., 2020). As mudanças climáticas podem causar a escassez de forragem em algumas regiões do planeta num futuro não tão distante. Isso pode reduzir a produtividade dos animais e aumentar os custos de produção. Caso não sejam tomadas ações eficientes para mitigação e/ou sejam definidas novas estratégias de adaptação, possivelmente haverá impacto negativo na segurança alimentar das pessoas (SOUSA, 2023; WANG *et al.*, 2019)).

Encontrar soluções para lidar com as mudanças climáticas é crucial para o desenvolvimento de políticas públicas efetivas, que possam servir como abordagens para lidar com os impactos ambientais resultantes dessas alterações no clima da Terra. Para que isso funcione de maneira eficiente é fundamental contar com a colaboração, não apenas das lideranças governamentais, mas também de toda a sociedade, afinal, para reduzir a emissão de

gases de efeito estufado (GEE), são necessárias mudanças nos hábitos cotidianos das pessoas. Isso envolve não apenas promover o uso sustentável dos recursos naturais, mas também o desenvolvimento de tecnologias ecologicamente corretas para a preservação do meio ambiente (FIGUEIREDO *et al.*, 2024).

Apesar da sua importância, o bioma Cerrado vem enfrentando diversas ameaças, e dentre elas estão às mudanças climáticas globais, que estão alterando os padrões climáticos e impactando diretamente neste ecossistema (WEICHERT, 2024). Além dessas mudanças possuírem potencial para causar danos econômicos, também podem causar a extinção de espécies nativas (Bettiol *et al.*, 2017; Artaxo, 2020). Segundo as previsões de modelos climáticos do IPCC, até o final deste século pode ocorrer uma elevação da temperatura média entre 2 °C e 4°C. Está alteração pode levar a uma antecipação de florada e alterações na germinação de sementes. Em algumas regiões pode ocorrer a redução de precipitação entre 20% a 40% (SILVA *et al.*, 2015).

Antecipar riscos, simular possíveis cenários e estudar medidas de adaptação é de suma importância para o sucesso da produção de forrageiras no cenário das Mudanças climáticas. Pensando nisso, Santos *et al.* (2015) estimaram, por meio de modelos, a resposta das principais forrageiras utilizadas no Brasil a cenários de mudanças climáticas moderadas e altas, em estimativas geradas a partir dos modelos de circulação global PRECIS e do ETA – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, para os anos de 2025 e 2055. Para as regiões do Brasil central, foram utilizados os capins do gênero *Brachiaria* e *Panicum*, e ambos mostraram boa resposta aos modelos, com aumentos de produção na maior parte da região, com altas entre 0 e 10% para 2025 e de 10 e 20% para 2055. As regiões onde não ocorreu o aumento da produção estão nas divisas com o semiárido, onde a disponibilidade de água é um fator limitante significativo.

Prado *et al.* (2016) em estudo realizado com o capim *Panicum maximum* Jacq. [*syn. Megathyrsus maximus* (Jacq.) BK Simon & SWL Jacobs], observaram que a elevação da temperatura e da concentração de CO₂ atmosférico, individualmente ou combinados, possuem efeitos na fenologia das folhas, desenvolvimento, morfologia e biomassa autotrófica/heterotrófica. Em condições de inverno, com água e nutrientes suficientes, o aumento da concentração de CO₂ para 600 ppm promove um efeito inibidor sobre a expansão de folhas, prejudicando o desenvolvimento da folhagem. Já o aumento da temperatura em 2°C resultou em uma melhoria em área e biomassa foliar, na última com um acréscimo de 22% em relação ao controle. No tratamento com aumento tanto de concentração de CO₂ quanto de temperatura média, também foi observado um aumento de biomassa foliar de 15%, indicando

que a temperatura é capaz de compensar o efeito inibidor do aumento da concentração de CO₂. Em contraste, Tubiello *et al.* (2007), observaram que apesar do aumento da concentração de CO₂, ser benéfico para a produtividade de forrageiras, a interação com temperatura, disponibilidade de água e fertilidade do solo são determinantes para que este benefício seja concretizado. Isto em especial para as plantas C4, como é o caso da maioria gramíneas tropicais que são mais eficientes no uso do CO₂ e serão mais impactadas por temperatura e disponibilidade de água (ROJAS-DOWNING, 2017).

Cullen *et al.* (2021) utilizando o modelo biofísico Grassgro para estimar a produção de pastagens no sul da Austrália, observaram que quando comparado os resultados obtidos utilizando dados climáticos de 1986 a 2005, e os obtidos entre 2000 e 2019, ocorreu uma redução de 15% da precipitação anual, ocorrendo também um decréscimo da produção anual. Neste mesmo estudo, também foi simulado a produção em projeções futuras para 2030 e 2050, sendo o cenário de 2000 a 2019, o de menor produtividade, demonstrando que os impactos das mudanças climáticas já estão ocorrendo em pastagens, e que as projeções futuras podem ser ainda mais críticas do que os esperados atualmente.

Pezzopane *et al.* (2017), utilizaram o modelo agrometeorológico empírico para prever a produção de forragem de *P. maximun* cv. Tanzânia, considerando dados de estações meteorológicas brasileiras e cenários climáticos futuros para 2025 e 2055, e puderam observar que para a região do bioma Cerrado, a produção estimada aumentou entre 10 e 20% para o cenário de 2055, segundo ele, devido a resposta de forrageiras tropicais ao aumento médio de temperatura. Porém, ainda indicou incertezas devido ao método considerar temperaturas somente até 31,2 ° C, não considerando os efeitos de temperaturas superiores na produção. Com este método também não foi possível considerar a mudança nos padrões intensidade, distribuição e frequência das chuvas, demonstrando necessidade de novos ajustes e aprimoramento para novos estudos.

Harrison *et al.* (2016), realizaram estimativas comparando a produção em cenários climáticos futuros e com o mesmo cenário, acrescido também do aumento de eventos climáticos extremos, como chuvas com maior intensidade e ocorrência de ondas de calor. Nesta última, puderam observar uma menor produção anual nas pastagens, além de uma maior variabilidade ano a ano, observando que eventos climáticos extremos é uma variável importante para estimar e se preparar para os futuros cenários esperados pelas mudanças climáticas.

As projeções de mudanças climáticas, principalmente com o aumento dos eventos climáticos extremos, tornam a tolerância das forrageiras a estes eventos, uma característica mais desejável a cada dia. Segundo Assad *et al.* (2020), ao longo deste século haverá um aumento

entre 1,4 e 1,7 vezes na deficiência hídrica no bioma Cerrado, considerando modelos de projeções futuras de precipitação e o aumento da temperatura média, indicados pelos cenários do quinto relatório IPCC (RPC8.5). Eventos, mesmo que breves, como veranicos e geadas podem prejudicar significativamente a produção de forragem, dependendo do nível de adaptação da espécie utilizada. Até o momento, os cultivares de *Brachiaria* spp. e *Panicum* spp. utilizados no Brasil possuem pouca tolerância a baixas temperaturas, portanto, não são recomendados para regiões com risco alto de geadas fortes e/ou frequentes (SILVA *et al.*, 2022).

Apesar da diversidade de estudos sobre o assunto, existe certa dificuldade de inserir todas as variáveis em modelos, conforme observado por Santos *et al.* (2015), que utilizaram de um modelo que não respondia às variações de fertilidade de solo, de adubação, de manejo da planta forrageira e das concentrações de CO₂ atmosférico. Assim indicou que apesar de muitos modelos indicarem, aumento de produção, ocorre também um aumento da estacionalidade de produção, principalmente em regiões de clima tropical, onde o balanço hídrico da estação seca é limitante para produção de forragem. Isso significa que haverá flutuações mais marcantes na produção ao longo do ano, com períodos de alta produção durante as estações chuvosas e significativa redução durante as estações secas.

Portanto, mais do que isolar fatores, é importante considerar a soma e até mesmo sinergia em modelos para estimar de forma mais assertiva as futuras condições da produção de forragem, tendo em vista que as mudanças climáticas possuem diversas variáveis de alta complexidade influenciando no resultado final. Haja vista a necessidade de haver um planejamento cuidadoso do manejo das pastagens para assegurar que haja forragem suficiente disponível durante todo o ano. Isso pode incluir a rotação de pastagens, o uso de espécies forrageiras mais resistentes à seca e a implementação de sistemas de irrigação onde viável.

4.2 Plantas C3 e as mudanças climáticas

As mudanças climáticas têm um impacto substancial no crescimento das plantas C3, que incluem muitas das culturas agrícolas essenciais para a alimentação humana, como o Trigo (*Triticum aestivum* L.), o Arroz (*Oryza sativa* L.) e a Soja (*Glycine max* (L.) Merr.). Plantas C3 realizam um tipo de fotossíntese que é particularmente sensível a fatores ambientais como temperatura, concentração de CO₂ e disponibilidade de água. Alterações nestes fatores devido ao aquecimento global e ao aumento dos níveis de CO₂ atmosférico têm mudado as condições para o desenvolvimento dessas plantas, o que resulta em adaptações variadas. Estes efeitos são

amplamente estudados, já que as plantas C3 representam uma parcela significativa da produção agrícola global (TAIZ; ZEIGER, 2013).

O aumento da temperatura é uma das principais consequências das mudanças climáticas e afeta diretamente o metabolismo das plantas C3. Plantas que realizam a fotossíntese C3 possuem uma enzima chave chamada Rubisco, que é mais eficiente em temperaturas moderadas e pode perder eficiência em temperaturas elevadas devido ao aumento da fotorrespiração, um processo que compete com a fotossíntese pelo uso de carbono (ALLEN *et al.*, 2011). A elevação das temperaturas tende a intensificar essa competição, reduzindo a capacidade de fixação de carbono e, consequentemente, limitando o crescimento e o rendimento das plantas C3, especialmente em regiões já afetadas por altas temperaturas. Por outro lado, o aumento da concentração de CO₂ atmosférico pode ter um efeito compensatório para algumas plantas C3. Em condições normais, o processo de fotorrespiração reduz a eficiência da fotossíntese em plantas C3; no entanto, com maiores concentrações de CO₂, a Rubisco tende a aumentar sua taxa de fixação de carbono e diminuir a fotorrespiração (ARAGÃO *et al.*, 2019). Estudos experimentais mostram que algumas plantas C3 apresentam uma maior biomassa quando expostas a concentrações elevadas de CO₂, o que sugere que essa condição pode ser benéfica para seu crescimento. No entanto, os efeitos desse aumento variam de acordo com a espécie e com outras condições ambientais.

A disponibilidade de água também é uma variável crucial afetada pelas mudanças climáticas e essencial para o crescimento de plantas C3. Com as mudanças nos padrões de precipitação e um aumento na frequência de secas, a disponibilidade hídrica tornou-se mais limitada em muitas regiões, prejudicando diretamente as plantas C3, que são menos adaptadas a ambientes secos do que plantas C4 (IPCC, 2021). Em condições de déficit hídrico, a taxa de fotossíntese diminui, e as plantas C3 enfrentam dificuldades em manter seu crescimento e produtividade. Além disso, mudanças no ciclo hidrológico global também afetam a quantidade de nutrientes que as plantas conseguem absorver do solo, um fator que é fundamental para o seu desenvolvimento e rendimento.

Estudos e experimentos de campo são essenciais para entender as respostas específicas dessas plantas e, assim, ajudar na adaptação da agricultura em um cenário de mudanças climáticas aceleradas. Estratégias como o desenvolvimento de cultivares mais resistentes e a utilização de técnicas de manejo mais sustentáveis são propostas para mitigar esses impactos (FLEXAS; MEDRANO, 2002). A compreensão das respostas das plantas C3 ao novo ambiente climático é fundamental para assegurar a segurança alimentar global.

4.3 Plantas C4 e as mudanças climáticas

As mudanças climáticas também impactam de forma relevante o crescimento das plantas C4, que incluem culturas de grande importância econômica, como o Milho (*Zea mays* L.), a Cana-de-Açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e o Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.). Diferentemente das plantas C3, as plantas C4 apresentam eficiência fotossintética mais elevada em condições de alta luminosidade e temperatura, o que as torna particularmente adaptadas a climas quentes e ambientes com menor disponibilidade de água. A fotossíntese C4 é caracterizada por uma maior resistência à fotorrespiração e pelo uso eficiente da enzima PEP carboxilase (fosfoenolpiruvato carboxilase), o que lhes confere algumas vantagens em ambientes onde as plantas C3 tendem a ser menos produtivas (TAIZ; ZEIGER, 2013).

O aumento da temperatura global impacta positivamente o metabolismo das plantas C4 até certo limite, já que elas apresentam melhor desempenho em temperaturas elevadas, onde podem manter alta eficiência fotossintética (ALLEN *et al.*, 2011). No entanto, temperaturas extremamente altas, acima do ponto ótimo de funcionamento das enzimas fotossintéticas, podem levar a estresses térmicos que afetam negativamente o crescimento e a produtividade dessas plantas. Regiões que já possuem clima quente, como áreas tropicais e subtropicais, podem enfrentar desafios no cultivo de plantas C4 se as temperaturas continuarem a aumentar significativamente (ARAGÃO *et al.*, 2019).

Com relação à concentração de CO₂, as plantas C4 são menos responsivas ao aumento de CO₂ atmosférico do que as plantas C3. Isso ocorre porque a fotossíntese C4 já possui mecanismos para minimizar a fotorrespiração e otimizar a fixação de carbono, mesmo em condições de baixa concentração de CO₂. Portanto, embora o aumento de CO₂ possa beneficiar ligeiramente as plantas C4, este efeito é menos pronunciado do que em plantas C3, resultando em ganhos de biomassa relativamente menores em estudos comparativos (FLEXAS; MEDRANO, 2002). Assim, o aumento de CO₂ representa um fator de impacto menos relevante para o crescimento de plantas C4, que são fisiologicamente adaptadas a manter uma alta eficiência mesmo em condições de CO₂ limitado.

Outro fator importante é a disponibilidade de água, uma vez que as plantas C4 apresentam maior eficiência no uso da água em comparação às plantas C3. Essa característica as torna menos vulneráveis à seca, uma vez que conseguem manter níveis de produtividade razoáveis em condições de estresse hídrico (IPCC, 2021). Com a intensificação das mudanças climáticas, as regiões afetadas pela diminuição das chuvas e pelo aumento da frequência de secas podem se embasar nas plantas C4 como uma alternativa para a agricultura, dada sua

capacidade de conservar água e adaptar-se a períodos de baixa precipitação. Assim, em um cenário de mudanças nos padrões de chuva, as plantas C4 podem ter um desempenho comparativamente melhor que as C3.

As mudanças climáticas afetam as plantas C4 de maneira diferente das plantas C3, principalmente em função de suas adaptações fisiológicas. As plantas C4 tendem a se beneficiar em ambientes quentes e secos, mas são menos responsivas ao aumento de CO₂. Desenvolver estratégias agrícolas que possam maximizar a produtividade das culturas C4 em um cenário de aquecimento global terá que fazer parte de novos pacotes tecnológicos. Investimentos em pesquisas voltadas ao manejo eficiente de recursos e à seleção de cultivares com maior tolerância ao estresse térmico e hídrico podem contribuir para a segurança alimentar em regiões onde as plantas C4 são predominantes (TAIZ; ZEIGER, 2013).

4.4 Bioma Cerrado e a produção de forragem

O Cerrado é um bioma que possui como característica marcante a presença de duas estações bem definidas, sendo um verão úmido e um inverno seco. Tanto o solo, quanto a vegetação, possuem como fator de formação a estacionalidade do clima, tendo como característica predominantes da flora, árvores de pequeno porte, com caules retorcidos, e casca e folhas grossas, atributos que possibilitam uma melhor sobrevivência a seca, diminuindo a perda de água para o ambiente, e proporcionando resistência as queimadas que também são comuns durante a estação seca do ano. Já o solo, predominam os latossolos, que possuem alto grau de intemperismo e baixa fertilidade, originados também da marcha estacional das precipitações (NASCIMENTO; NOVAIS, 2020).

A temperatura média da superfície do bioma Cerrado durante o ano é de 23,7 °C, temperaturas máximas médias de 28,1 °C e com mínimas médias de 15,6 °C, possuindo grande influência da latitude e altitude, com médias maiores em regiões próximas da linha do equador, e médias menores em regiões com altitudes superiores. A precipitação anual do cerrado, varia muito em função da região, estando entre 650 mm e 2.250 mm, as menores sendo observadas nas regiões de limite com o bioma Caatinga e as maiores nas regiões limite com os biomas Pantanal e a Amazônia. Em média a precipitação anual é de 1394 mm (SANO *et al.*, 2020)

Tratando-se da produção de alimentos, o Cerrado é responsável por uma parcela de aproximadamente 40% da produção nacional de cereais, incluindo as culturas como soja, milho, arroz e feijão. A expansão da agricultura no Cerrado foi impulsionada pela disponibilidade de grandes áreas de terras relativamente planas, adequadas para a mecanização agrícola, e pelo

desenvolvimento de técnicas agrícolas e cultivares adaptadas às condições do bioma; e de 35% do rebanho bovino, portanto equivalente a uma parte significativa da produção de carne bovina e leite no país. As pastagens no Cerrado são utilizadas para a criação de gado de corte e leiteiro, e a região é um importante centro de produção pecuária (BOLFE *et al.*, 2020).

Com cerca de 85 milhões de hectares ocupados pela agricultura e pastagens, área está representa uma grande porção do bioma, evidenciando a intensidade da utilização da terra para a produção de alimentos. Além das pastagens plantadas ocuparem em média 30% da área do bioma, no qual uma parte significativa do bioma é dedicada à criação de gado em pastagens que foram estabelecidas por meio de plantio, em vez de pastagens nativas. Essas pastagens são geralmente formadas por gramíneas introduzidas que são mais produtivas e adequadas para a criação de gado. (BOLFE *et al.*, 2020).

A expansão de áreas de pastagem no Cerrado aumentou aproximadamente 21 milhões de hectares entre 1985 e 2017, principalmente até o início do século XXI, onde essa expansão se estabilizou, chegando até mesmo a reduzir sua área em alguns momentos da década de 2010. Isso ocorreu em parte pelo combate ao desmatamento e também pelo crescimento das áreas destinadas aos cereais e cana de açúcar (PARENTE *et al.*, 2019).

Se tratando da produção de forragem, está tem se tornado vital para a pecuária brasileira, que é uma das principais atividades econômicas da região. As forrageiras, plantas utilizadas para a alimentação dos animais, principalmente de ruminantes como bovinos, caprinos e ovinos, são essenciais para sustentar a grande produção de carne e leite. O Cerrado é particularmente adequado para essa atividade devido às características físicas do solo e à adaptação das forrageiras às condições climáticas da região.

4.5 Fatores ambientais na produção de forragem

O desenvolvimento das plantas e consequentemente a produtividade está intimamente relacionado as condições ambientais, que muitas vezes são imprevisíveis e não controláveis. Dentre estes estão a disponibilidade de água, a fertilidade do solo, a temperatura, a radiação solar, a concentração de CO₂ atmosférico, vento, topografia, dentre outros. Radiação solar, concentração de CO₂ atmosférico, temperatura e disponibilidade de água, possuem destaque por estarem diretamente relacionados ao processo de fotossíntese (TAIZ *et al.*, 2017).

Durante o processo de fotossíntese, ocorre a transformação de energia proveniente da radiação solar, na presença de CO₂, água e nutrientes, em energia química na forma de carboidratos, ocorrendo a fixação do carbono atmosférico, que logo em seguida é utilizado

como constituinte de tecidos vegetais. Deste modo, a produtividade das forrageiras advém da taxa de assimilação de carbono em função do tempo (LEMAIRE; CHAPMAN, 1996).

A água é o principal veículo de absorção de nutrientes das plantas e dentre os fatores ambientais é um dos principais gargalos no desenvolvimento forrageiro, tendo em vista que na maior parte dos casos as precipitações são inferiores a evapotranspiração. Além disso, a água atua na regulação estomática das plantas, participando, portanto, da regulação de temperatura interna e no processo de fotossíntese (HARRISON *et al.*, 2019; SCHIPPERS *et al.*, 2015). Em situações de estresse hídrico, os primeiros processos a serem paralisados são o alongamento tanto de folhas, quanto de raízes. Segundo Habermann *et al.* (2019b), o déficit hídrico reduz a produção de biomassa de folhas secas, e aumenta o teor lignina, de fibra solúvel em detergente neutro (FDN), fibra solúvel em detergente ácido (FDA), e consequentemente reduz a digestibilidade da forragem de Capim-Mombaça.

Outro fator de grande importância é a temperatura, que tem impacto na fenologia da planta, na atividade de enzimas, na fotossíntese, na abertura estomática e no ciclo circadiano das plantas. Até certo ponto, o aumento de temperatura é benéfico para a fotossíntese, depois a atividade enzimática pode diminuir (MOORE *et al.*, 2021). Temperaturas acima da faixa ideal para determinada espécie, elevam a transpiração e podem até mesmo levar ao fechamento total ou parcial dos estômatos, portanto influenciando também na absorção de nutrientes e água.

Quanto ao valor nutritivo de forrageiras tropicais, o aumento de temperatura aumenta a produção de massa foliar, porém reduz o valor nutritivo da forragem (HABERMANN *et al.*, 2019a). A temperatura, quando abaixo da temperatura basal inferior, reduz o desenvolvimento das forrageiras tropicais a quase zero, tratando-se de forrageiras tropicais, adota-se valores de temperatura basal inferior, entre 14 e 17°C (YAMORI *et al.*, 2014). Em outras palavras, o aumento da temperatura pode levar a um incremento na produção de massa foliar das forrageiras tropicais. Esse fenômeno ocorre porque temperaturas mais elevadas aceleram a taxa de crescimento das plantas, desde que outros fatores, como água e nutrientes, estejam disponíveis em quantidades adequadas. A ressalva nesse sentido encontra-se no fato que o aumento na produção de massa foliar geralmente vem acompanhado de uma diminuição do valor nutricional da forragem. Isso se deve à redução dos teores de proteínas e ao aumento das fibras estruturais, o que diminui a digestibilidade e o valor nutritivo para os animais (HABERMANN *et al.*, 2019a).

4.6 Mudanças climáticas: histórico, panorama atual e perspectivas futuras

Desde os anos 70 até os dias de hoje as questões ambientais e as mudanças climáticas têm sido discutidas por líderes mundiais em pesquisas científicas e também em conferências da ONU. Esse debate vem crescendo ao longo dos tempos e tornou-se uma preocupação crescente em escala global. Só a partir dos anos 90 é que se iniciaram os primeiros avanços nesta área. Para promover a discussão sobre as mudanças climáticas e o aquecimento global foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC em 1990 e alguns anos depois em 1992 ocorreu a primeira convenção dedicada exclusivamente ao debate das mudanças climáticas, a chamada Conferência Internacional sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável conhecida como ECO-92 (OKEREKE; COVENRY, 2016).

Nesta conferência foi estabelecida a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, onde mais 180 países assinaram e demonstraram pela primeira vez um esforço global em prol do combate as Mudanças Climáticas. O principal objetivo estaria em reduzir a emissão dos GEE, com enfoque no CO₂ e amenizar o agravamento do efeito estufa e consequente do aquecimento global.

Apesar do grande número de participantes, do reconhecimento do objetivo e necessidade da cooperação internacional para redução dos GEEs, ainda não haviam metas de redução, que somente foram estabelecidos pelo chamado Protocolo de Quioto, que começou a ser assinado em 1997. Entretanto, devido a falta de adesão e assinaturas, principalmente em razão dos discursos dos EUA e da Rússia pelas inseguranças econômicas e alegação de incertezas científicas sobre o aquecimento global, o protocolo só entra em vigor em 2005, com o convencimento e assinatura da Rússia. Além da Rússia, o protocolo de Quioto foi assinado por mais de 190 países, incluindo: Brasil, Alemanha, França, Itália, Noruega, Portugal, União Europeia e Japão. O protocolo previa a redução de 5,2% na emissão de gases do efeito estufa para o período entre 2008 e 2012. As metas do acordo previam cotas de redução para os países com maior emissão GEE, cotas limitando o aumento das emissões para alguns países, e nenhum meta para os países em desenvolvimento (BUENO RUBIAL, 2016).

Apesar da mobilização e compromisso de tantos países quanto ao Protocolo de Quioto, as emissões dos Gases do Efeito Estufa continuaram crescendo quando comparados ao ano de 1990 em comparação com o ano de 1990, durante este período, muitos países conseguiram reduzir as emissões de GEE, porém em emissões globais sofreram alta de 38%. Então em 2015, foi realizado o Acordo de Paris, reafirmando o compromisso em reduzir os impactos das mudanças climáticas e desta vez buscando adequar possíveis falhas levantadas por assinantes e

não assinantes do Protocolo de Quioto. Dentre elas, estabelecer metas de redução na emissão de GEE também para países em desenvolvimento. O objetivo principal seria limitar o aquecimento do planeta a 2°C neste século (NUNES, 2022).

Ao que se refere a temperatura global, portanto à média da temperatura da superfície da Terra, considerando tanto as temperaturas dos continentes quanto dos oceanos, é calculada a partir de uma vasta rede de medições de temperatura coletadas em estações meteorológicas terrestres, boias oceânicas, navios e satélites ao redor do mundo. Esses dados incluem temperaturas do ar sobre a terra e temperaturas da superfície do mar (NOBRE, 2024).

Para calcular a temperatura global, os cientistas utilizam métodos estatísticos para combinar e ajustar os dados das diferentes fontes, levando em consideração fatores como a distribuição geográfica das estações de medição e as diferenças entre as temperaturas diurnas e noturnas, ou seja, um indicador crucial do estado do clima da Terra. Variações na temperatura global são usadas para monitorar e entender mudanças climáticas, incluindo o aquecimento global (NOBRE, 2024).

Segundo o IPCC (2023), a temperatura média global entre 2011 e 2020, foi entre 0,95 a 1,2°C mais alta que entre 1850 e 1900, com aumentos maiores na parte continental, entre 1,34 e 1,83°C, que no oceano, entre 0,68 a 1,01°C. Segundo o mesmo estudo, aumento de temperatura nos últimos 50 anos, foi o maior dos últimos 2000 anos e caso as emissões continuem no ritmo atual, é previsto um aquecimento global entre 2,2 a 3,5°C até o ano de 2100, muito aquém das metas buscadas pelo Acordo de Paris.

Observando as projeções de alterações quanto a precipitação, deve ocorrer um aumento em chuvas internas e veranicos, indicando uma mudança quanto a frequência, intensidade e distribuição de chuva durante os anos. Diminuindo a previsibilidade do período chuvoso, a janela de plantio acaba se reduzindo, e os riscos da agricultura se ampliando. Isso também existem os desafios quanto ao fornecimento de água em áreas onde há diminuição da pluviosidade ou precipitações com intensidades que excedem a taxa de infiltração do solo, o que pode comprometer o processo de recarga dos aquíferos e afetar diretamente a disponibilidade de água superficial e subterrânea (UNEP, 2023). Além disso, o aumento da temperatura em sinergia com as alterações nos padrões de chuva também pode resultar na redução da disponibilidade de água e aumentar o estresse hídrico, já que pode elevar a transpiração das plantas e a evaporação da água no solo.

As mudanças climáticas, quando observados os dados referentes aos eventos climáticos extremos, acabam se tornando ainda mais preocupantes. Se espera um aumento de duras secas, ondas de calor, incêndios, ciclones, inundações e chuvas intensas. Comparando esses eventos

na década de 1950 e atualmente, já é possível observar este aumento. Estes eventos contribuem significativamente para o aumento da escassez de água, e problemas alimentares em várias partes do mundo, tendo impactos negativos também na agricultura e a pecuária (IPCC, 2014; IPCC, 2023).

4.7 Impactos na Fenologia e Crescimento das Forrageiras

A fenologia vegetal se trata do estudo das fases de desenvolvimento e alterações morfológicas das plantas. Os fatores ambientais como temperatura, precipitação e concentração atmosférica de CO₂ podem levar a alterações no desenvolvimento e morfologia das plantas. Visto que estes fatores abióticos vêm sofrendo alterações consideráveis, com previsões progredirem no futuro de médio e longo prazo, isto devido as mudanças climáticas. Estas mudanças possuem potencial para afligir a fenologia das forrageiras (DIAS-FERREIRA, 2023).

Esses fatores podem afetar desde a germinação, crescimento, floração, até a frutificação (PLAUTZ, 2022). Dentre estes fatores está a temperatura, uma das mais estudadas e com aumento progressivo e quase certo para até o fim deste século. O aumento de temperaturas acelera o metabolismo vegetal, isto até o seu chamado limite térmico superior, onde além deste o metabolismo pode ser pausado ou até mesmo se tornar negativo devido ao estresse por calor. (BISPO, 2020).

Outro fator abiótico que pode influenciar na fenologia das plantas, é o regime de precipitações. Em regiões de clima semiárido e savânico, como é o caso dos biomas brasileiros caatinga e cerrado, esse fator é ainda mais evidente, visto que as plantas nativas destes habitats, ajustam seu ciclo ao regime sazonal de chuvas da região. Além disso, o déficit hídrico pode causar desuniformidade de germinação e redução de crescimento, em casos mais severos, causa queda de folhas e abortamento de flores e frutos. A falta de água também, seja leve ou moderada, pode adiantar florescimento e amadurecimento, além de floradas e amadurecimentos desuniformes de sementes e frutos (BERGAMASCHI, 2007).

Ainda se tratando de precipitações, com a expectativa de aumento dos eventos climáticos extremos, como chuvas excessivas, forrageiras que não possuem tolerância ao alagamento podem levar a sérios danos econômicos (IPCC, 2023). Nestas condições a água ocupa todos os poros do solo, limitando a disponibilidade de oxigênio, prejudicando os processos de respiração e fotossíntese, afetando o crescimento e em quando em períodos mais longos levando a morte de raízes e plantas que ficaram submersas (MADSEN, 1993). Por outro

lado, chuvas intensas podem levar à erosão do solo e lixiviação de nutrientes, prejudicando ainda mais a produtividade das forrageiras (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA., 2010).

4.8 Alterações na Composição e Qualidade Nutricional

Consequentemente as mudanças climáticas acabam afetando diretamente a composição química das forrageiras. O aumento das concentrações CO₂ na atmosfera pode alterar as taxas de fotossíntese, levando a mudanças na produção de carboidratos e proteínas nas plantas. Estudos mostram que, sob condições de elevado CO₂, algumas forrageiras podem apresentar aumento na produção de carboidratos solúveis, mas uma diminuição na concentração de proteínas. Essa alteração na composição pode reduzir a qualidade nutricional das pastagens, já que a proteína é um nutriente essencial para o crescimento e produção animal (BRAGA *et al.*, 2021). Além disso, as temperaturas mais altas podem acelerar a maturação das plantas, reduzindo o tempo de crescimento vegetativo e a concentração de nutrientes. As plantas que crescem mais rápido sob temperaturas elevadas podem acumular menos nutrientes, resultando em forrageiras de menor valor nutritivo. (MARSCHNER, 1995).

Sob condições de estresse hídrico e altas temperaturas, as plantas tendem a aumentar a concentração percentual de lignina, e reduzir a digestibilidade. A lignina se liga às fibras de celulose, tornando-as menos acessíveis às enzimas digestivas dos ruminantes. Consequentemente, a eficiência alimentar diminui, aumentando a quantidade de forragem necessária para manter a produção animal (BARRETO *et al.*, 2001; SANTOS *et al.*, 2001). Sobre tudo, segundo Dias Filho *et al.*, (1991), condições de estresse hídrico moderado, como veranicos breves durante a época chuvosa, podem resultar em um aumento da digestibilidade.

4.9 Adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas

Frente a realidade das mudanças climáticas, e a crescente repulsa com que mercados com maior poder aquisitivo, tratam sobre sistemas agropecuários não sustentáveis, ou convencionais, se adequar através de estratégias de adaptação e mitigação já é necessidade do presente (WEICHERT, 2024). Estas estratégias devem buscar por sistemas que permitam, a adaptação aos impactos climáticos de cada região, além da capacidade de demonstrar que os produtos advêm de sistemas mitigadores ou até mesmo sequestradores de carbono.

Para isso é uma visão holística do sistema agropecuário, de forma a buscar implantar variedades adaptadas as possíveis fontes de estresse abiótico da região, realizar também um

manejo adequada do solo e da água, se possível utilizar fontes renováveis de energia, ajustar a capacidade de suporte de pastagens (GUIMARÃES *et al.*, 2023).

Para lidar com os efeitos das mudanças climáticas na produção de forragens de forma eficiente e sustentável é necessário adotar uma estratégia integrada que una avanços tecnológicos com práticas agrícolas conscientes e políticas públicas efetivas. Quanto as estratégias que os produtores rurais poderão se adaptar para desenvolver suas atividades, é indispensável destacar que as mudanças climáticas representam um desafio significativo para a produção de forrageiras. Para os produtores rurais que dependem dessas plantas para a alimentação animal, adaptar-se às novas condições climáticas é crucial para manter a sustentabilidade e a rentabilidade da pecuária (SANTOS, 2022).

O manejo sustentável dos recursos naturais também é fundamental para se adaptar as mudanças climáticas e também as exigências de compradores de nichos mais exigentes, que tendem a crescer. Em relação ao manejo sustentável dos recursos naturais, pode se dizer que este é fundamental para a adaptação às mudanças climáticas. Práticas como a rotação de culturas, a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e o uso de adubação verde contribuem para a melhoria da saúde do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e nutrientes. A conservação do solo, através de técnicas como o plantio direto e a cobertura vegetal, reduz a erosão e melhora a infiltração de água, o que é crucial durante períodos de seca prolongada (ASSAD, 2021).

Em se tratando das mudanças nos sistemas de manejo da pecuária, destaca-se que as alterações também são necessárias para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas. Além disso, o ajuste da carga animal, ou seja, o número de animais por hectare, de acordo com a capacidade de suporte do pasto em diferentes condições climáticas, ajuda a evitar a superpastejo e a degradação das pastagens. A suplementação alimentar durante períodos críticos, como a seca, também pode ser uma prática essencial. O uso de silagem, feno e outros tipos de forragem conservada garante que os animais recebam a nutrição adequada, mesmo quando a produção das pastagens está comprometida seja pela falta de água ou pelo frio como limitante de crescimento (GOIS, 2020).

A pesquisa e o desenvolvimento no campo da biotecnologia vegetal têm avançado significativamente, trazendo inovações que podem ser aplicadas na melhoria da adaptação das forrageiras. A edição de genes, utilizando ferramentas como o CRISPR/Cas9, tem se mostrado promissora para a criação de plantas com características específicas de resistência e produtividade. No entanto, é importante que essas tecnologias sejam aplicadas de maneira

responsável e sustentável, considerando os possíveis impactos ambientais e sociais (SOGAYAR, *et al.*, 2023).

Além da melhoria genética, a seleção de espécies resilientes envolve a identificação de plantas nativas das mais diferentes regiões que possuem características desejáveis para a produção de forragem. Este método de seleção tem sido o principal, utilizado no melhoramento de forrageiras tropicais no Brasil. A seleção tem por característica ser mais simples e rápido, porém não é infinito, visto que as espécies da natureza com características desejáveis, tende a ficar mais escasso à medida que a seleção acontece (MILES, 2007)

O desenvolvimento de variedades de forrageiras com características desejáveis para sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta também é importante direcionamento à melhoria genética. Como é o caso da cultivar BRS Integra espécie forrageira *Urochloa ruziziensis* (syn. *Brachiaria ruziziensis*) que surgiu como alternativa mais produtiva em período de entressafra, contribuindo para a produção de palhada utilizada também para sistemas de plantio direto (SOUZA SOBRINHO *et al.*, 2022).

4.10 Técnicas de Manejo Sustentável

Se tratando de técnicas de manejo sustentável e a mitigação da emissão de gases do efeito estufa, antes de mais nada é preciso ressaltar que além das reduções de emissão de GEE em valor total, também é importante considerar as emissões na chamada “pegada de carbono”, que se trata da quantidade de GEE por kg produzido. Para a pegada de carbono, práticas como a melhoria do grau tecnológico, melhoria genética e melhor aproveitamento de área, são ações que aumentam a produtividade e tendem a reduzir a pegada de carbono. Segundo Dick *et al.* (2015) durante o período de 1994 a 2014, no Brasil, houve uma de 49,6 para 38,5 kg CO₂ eq. / kg eq. carcaça (CWE), isto devido a maior adequação nutricional que também elevou a produção de carne dos rebanhos brasileiros. Quando analisaram também a mudança de uso da terra, essa redução sobe para 25,6 kg CO₂ eq. / kg eq. carcaça (CWE).

Outra prática com potencial para redução da emissão GEE e da pegada de carbono, é o consorcio entre gramíneas e leguminosas. Em solos tropicais se torna uma alternativa interessante para sanar o problema da baixa disponibilidade de N e redução de adubações nitrogenadas responsáveis pela emissão de N₂O, trazendo benefícios com a redução do uso de fertilizantes nitrogenados e com a melhoria na qualidade nutritiva da pastagem como um todo (ANDRADE *et al.*, 2015).

Utilização de sistemas mais sustentáveis como os agroflorestais e os sistemas de integração lavoura-pecuário-floresta (ILPF) também são técnicas com excelentes resultados no que tange tanto a adaptação, quanto a mitigação. Estes sistemas partem de princípios de diversificação de espécies e componentes dentro de uma mesma área. (ASSAD *et al.*, 2019). A presença de árvores também é importante quando se trata do sequestro de carbono, sendo essencial quando se trata da construção de sistemas como o carne carbono neutro (CNN), em que a mesma proporção de GEE que são gerados durante a produção de carne, também são sequestrados, seja através da produção de madeira ou da inserção do carbono no solo. (DE ALMEIDA; LAURA; ALVES, 2015)

Outra prática sustentável está na adoção de boas práticas para a conservação do solo e da água. Técnicas como o terraceamento, o plantio em nível e a construção de bolsões de captação de água, possibilitam maior infiltração de água, além de também reduzirem problemas como a erosão do solo. A captação de água em períodos de maior disponibilidade, e seu armazenamento em piscinões e barramentos, também é importante para garantir a disponibilidade de água para irrigação em períodos onde os aquíferos tendem a reduzir sua vazão. Além disso a irrigação também deve ser mais eficiente, evitando desperdícios e quando possível aplicando água de forma direcionada as plantas. (MOURA; SILVA, 2021).

Porém, mesmo que técnicas sejam desenvolvidas e testadas, de nada adiantam, se não forem colocadas em prática no campo. Portanto, é também de suma importância que haja a extensão rural, seja por universidades, outras instituições ligadas a extensão rural pública e até mesmo parcerias público privadas. Além disso, com a inclusão destas instituições no desenvolvimento de técnicas sustentáveis, é possível realizar um elo entre a produtores e pesquisadores, de forma que o suprimento dos problemas de pesquisa, venham de reais necessidades de camponeses. A participação ativa dos produtores é importante para o sucesso e também possibilitando que esses sistemas perdurem ao longo dos anos e se tornem o novo convencional (EMATER-MG, 2020).

4.11 Políticas Públicas e Iniciativas Governamentais

Ao que tange as políticas públicas governamentais que versão sobre esse assunto, como abordado anteriormente, o governo brasileiro tem implementado diversas políticas públicas voltadas para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas no setor agropecuário. Uma das principais estratégias é o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), que promove a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, como a recuperação de

pastagens degradadas, o sistema de plantio direto e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Essas práticas não apenas aumentam a resiliência das forrageiras às variações climáticas, mas também contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa (MANZATTO *et al*, 2020).

Quanto aos incentivos econômicos e subsídios, o governo também oferece incentivos econômicos e subsídios para apoiar os produtores na adoção de práticas sustentáveis. Linhas de crédito com taxas de juros reduzidas, como as oferecidas pelo Programa de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF) e pelo Programa de Modernização da Agricultura e Conservação dos Recursos Naturais (MODERAGRO), são exemplos de medidas que visam facilitar o acesso dos produtores a tecnologias e insumos necessários para a adaptação às mudanças climáticas (CAMOZZI *et al.*, 2017). Portanto, incentivos estes que são particularmente importantes para os pequenos e médios produtores, que muitas vezes enfrentam maiores dificuldades financeiras para investir em práticas de manejo sustentável. Ao reduzir os custos de investimento, o governo contribui para a inclusão desses produtores nos esforços de adaptação climática (CAMOZZI *et al.*, 2017).

A educação e a capacitação dos produtores rurais são componentes essenciais das políticas públicas voltadas para a sustentabilidade da produção de forrageiras. Programas de extensão rural, como o Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR), oferecem cursos e treinamentos sobre práticas de manejo sustentável e técnicas de adaptação às mudanças climáticas. Essas iniciativas visam equipar os produtores com o conhecimento necessário para implementar práticas que aumentem a resiliência das suas propriedades (NERY, 2021). Além disso, campanhas de conscientização sobre a importância da preservação e do uso sustentável dos recursos naturais são promovidas para engajar a comunidade rural na luta contra as mudanças climáticas. A educação ambiental desempenha um papel crucial na mudança de comportamento e na adoção de práticas mais sustentáveis (NERY, 2021).

5 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada inicialmente com uma revisão integrativa da literatura, realizando uma busca baseada em material publicado (GIL, 2022). Para isso foram utilizados como fontes de dados, livros, relatórios e documentos técnicos de organizações governamentais e outras entidades reconhecidas como referência neste tema, artigos científicos, dissertações e teses, utilizando o recorte de tempo dos últimos 15 anos, de 2010 até 2024.

Para a seleção de materiais relevantes foram utilizadas busca por palavras-chaves nas bases de dados: Google Acadêmico, Scopus, SciELO e BASE. As palavras-chave utilizadas foram "mudanças climáticas", "forrageiras", "produção de pastagens", "impactos climáticos", para busca de materiais em português e "climate change", "forrage", "pasture production" e "climate impacts" para materiais publicados na língua inglesa. A busca eletrônica foi realizada no período de fevereiro a junho de 2024.

Após uma pré-seleção no total foram encontrados 57 artigos científicos e 3 dissertações, tratando-se da influência das mudanças climáticas na forragicultura. Em seguida, estes materiais foram novamente filtrados entre aqueles que geraram dados quantitativos ou qualitativos, e aqueles que compilaram dados de outros autores. Em seguida, foram extraídas as principais informações de 22 materiais que geraram os próprios dados, por meio de modelagem ou de experimentos em campo, que foram submetidos ao fichamento bibliográfico, onde os materiais foram organizados em tabelas e classificadas quanto ao "Clima", "Tipo de forrageira", "Método", "Fatores Ambientais", "Mudança de Fatores", e "Resultado".

As classificações quanto ao clima, variou entre tropical e temperado. O tipo de forrageira entre C3 ou C4. Métodos foram classificados em Experimento em campo e Modelagem. Fatores Ambientais foram classificados entre CO₂ (concentração de CO₂ atmosférico); Disponibilidade de água, Precipitação; Precipitação e temperatura média; Temperatura média; temperatura média e CO₂.

Na coluna mudança de fatores, quando foi o caso de temperatura média foi indicado com o número de graus celsius acrescidos, enquanto para CO₂, disponibilidade de água e precipitação foram indicados em percentual acréscimo ou de decréscimo. Resultados também foram indicados pelo percentual de acréscimo ou decréscimo de massa seca ou de Produtividade Primária Líquida (NPP).

A análise dos dados foi realizada com o auxílio de planilhas eletrônicas, utilizando o software Microsoft Office Excel® 2024. Os dados provenientes do levantamento do estudo foram tabulados e transformados em valores nominais e em percentuais, e a partir deles, foram construídos gráficos com o objetivo de facilitar a interpretação de todos os resultados obtidos. No presente estudo realizou-se uma análise exploratória dos dados e análises descritivas em que tabelas foram construídos com o pacote *dplyr* do programa estatístico R (R CORE TEAM, 2024).

Utilizou-se também a análise da árvore de decisão na qual trata-se de um fluxograma de uma parte da ideia principal e se ramifica com base nas consequências das decisões. Ela leva esse nome porque se assemelha a uma árvore com galhos. A análise da árvore de decisão foi

realizada utilizando a função *rpart* do pacote *rpart* do programa estatístico R (R CORE TEAM, 2024). Uma árvore de decisão é um modelo de aprendizado supervisionado que organiza o processo de tomada de decisão em uma estrutura hierárquica, semelhante a uma árvore. Cada nó interno representa uma condição ou teste sobre uma variável, e cada ramo representa um resultado do teste. Os nós terminais (folhas) contêm a decisão ou a classificação final.

6 RESULTADOS

Na exploração dos dados extraídos das referências estudadas, foi observada a variação de produção de biomassa positiva ou negativa seguindo os seguintes critérios: Aumento da temperatura entre 1,2 °C a 4,0 °C; Aumento da concentração de CO₂ atmosférico entre 50% e 88%; Redução da disponibilidade de água entre 24% e 23%; Redução da precipitação entre 1,8% e 33%; A produtividade variou entre redução de 25% a aumento de 119% da matéria seca. A produtividade primária líquida (NPP) foi de menos 11% em caso de redução da precipitação em 25% e de mais 7% em caso de aumento de temperatura em 4°C. Na Figura 1 está ilustrado os resultados da análise exploratória contendo a distribuição dos principais componentes encontrados. Observa-se que há poucos trabalhos sendo desenvolvidos com os impactos das mudanças climáticas na produção de forrageiras nos últimos 15 anos (Figura 1 A), no entanto, há um equilíbrio entre estudos realizados entre plantas C3 e C4 (Figura 1 C), plantas de clima tropical ou de Clima temperado (Figura 1 B), ou ainda o uso de experimentos em campo ou modelagem para alcançar as variações previstas com as mudanças no clima (Figura 1 D).

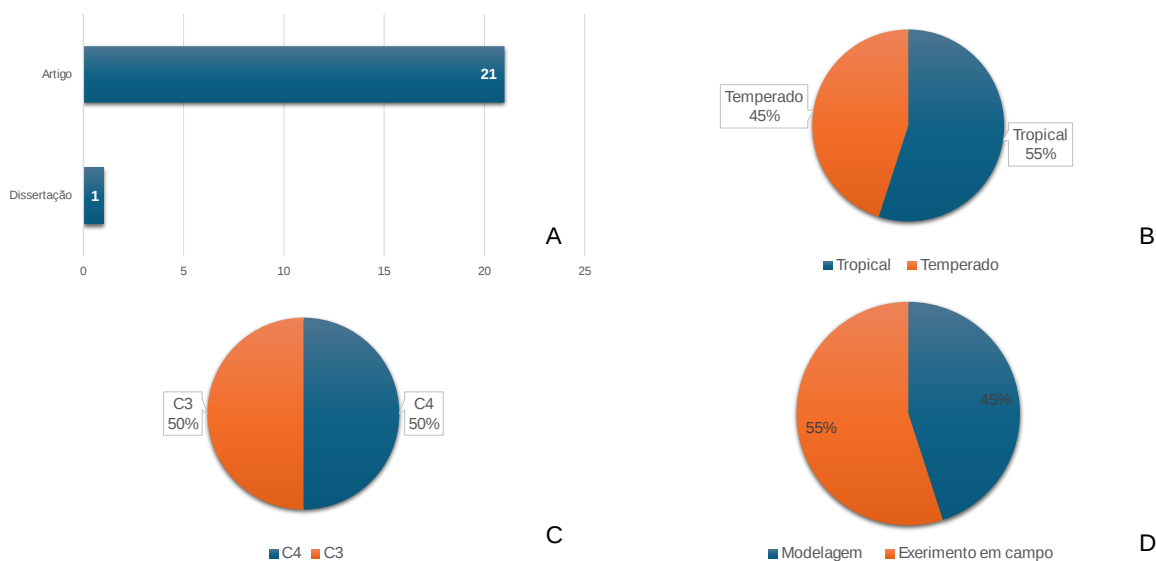


Figura 1. A- Material de literatura filtrada nas referências utilizadas; B- Clima onde cada estudo foi realizado nas referências utilizadas; C- Tipo de metabolismo das plantas nas referências utilizadas; D- Abordagem do estudo nas referências utilizadas. Fonte: do Autor (2024).

Os trabalhos utilizados na avaliação dos estudos em mudanças climáticas apontam para uma maior quantidade de estudos envolvendo mudanças na temperatura do ar seguido da relação entre precipitação pluviométrica e temperatura correlacionadas (Figura 2). Apesar dos painéis governamentais mostrarem dados sobre o aumento do CO₂ atmosférico acarretando mudanças em outras variáveis climáticas como precipitação e aumento de temperatura, nos trabalhos envolvendo forrageiras, por serem trabalhos geralmente agrônômicos voltados à produtividade vegetal, há maior caracterização da chuva e da temperatura. Isso mostra uma necessidade de reavaliação das características mensuradas em experimentos com forrageiras quando o objetivo é analisar as mudanças climáticas. Outro ponto importante e que superficialmente é comentado nesses trabalhos a avaliação da disponibilidade de água, abordada em apenas 3% dos trabalhos utilizados nesta análise.

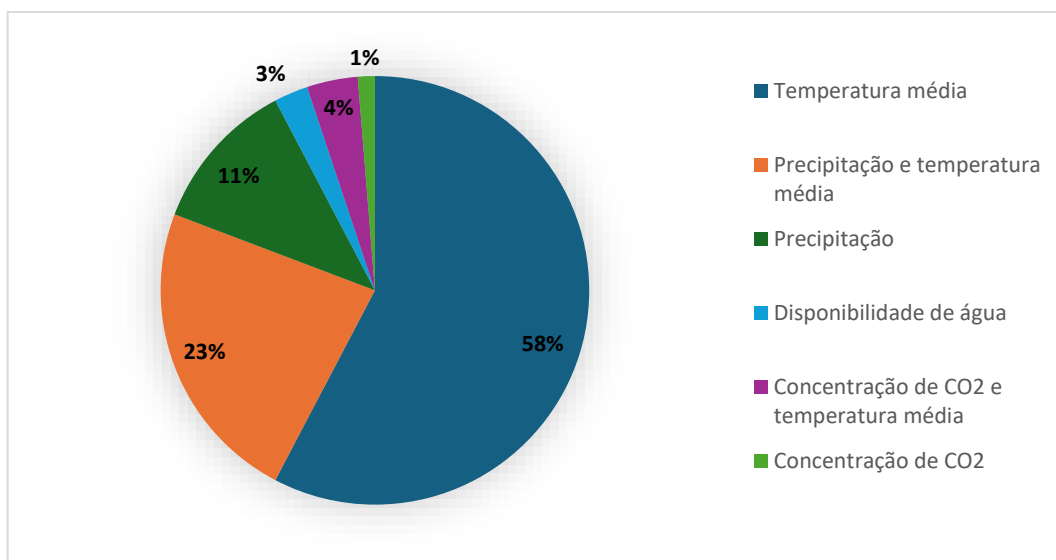


Figura 2 Fatores estudados nas principais pesquisas com mudanças climáticas na produção forrageira. Fonte: Autor (2024).

Quanto a relação existente entre os fatores abordados na literatura utilizada nesta análise, observa-se que a análise de fatores isolados não permite uma visão integrada dos eventos climáticos. Para tanto, a utilização do conceito estatístico da árvore de decisão elucida a relação entre os principais fatores responsáveis pelo aumento e/ou diminuição do potencial de produção de plantas forrageiras. Na Figura 3 está estruturada a árvore de decisão sobre fatores climáticos influenciando a produção de plantas C3, a partir do modelo de aprendizagem supervisionado, foram encontrados 8 resultados (nós terminais), sendo eles +2°C, +2,3°C; -20% de precipitação; -15% de precipitação e +1,8°C; -1,8% de precipitação e +1,2°C; +88% de CO₂; +1,2°C; +2°C; e +3,5°C.

Na Figura 4 está definida a árvore de decisão para mudanças na produtividade de plantas C4 a partir do modelo de aprendizagem supervisionado, foram encontrados 7 resultados (nós terminais), sendo eles +2°C, -9% de precipitação e +3,65°C; -24% de disponibilidade de água, -25% de água; +1,78°C, +2°C e +50 CO₂; +58,6% CO₂ e +3,4°C; +3°C; +2,5°C; e +50% CO₂ e +2°C. Observa-se para as plantas C3 o efeito de redução de precipitação é marcante na diminuição da produção enquanto para as plantas C4 a redução da disponibilidade da água torna o sistema menos produtivo.

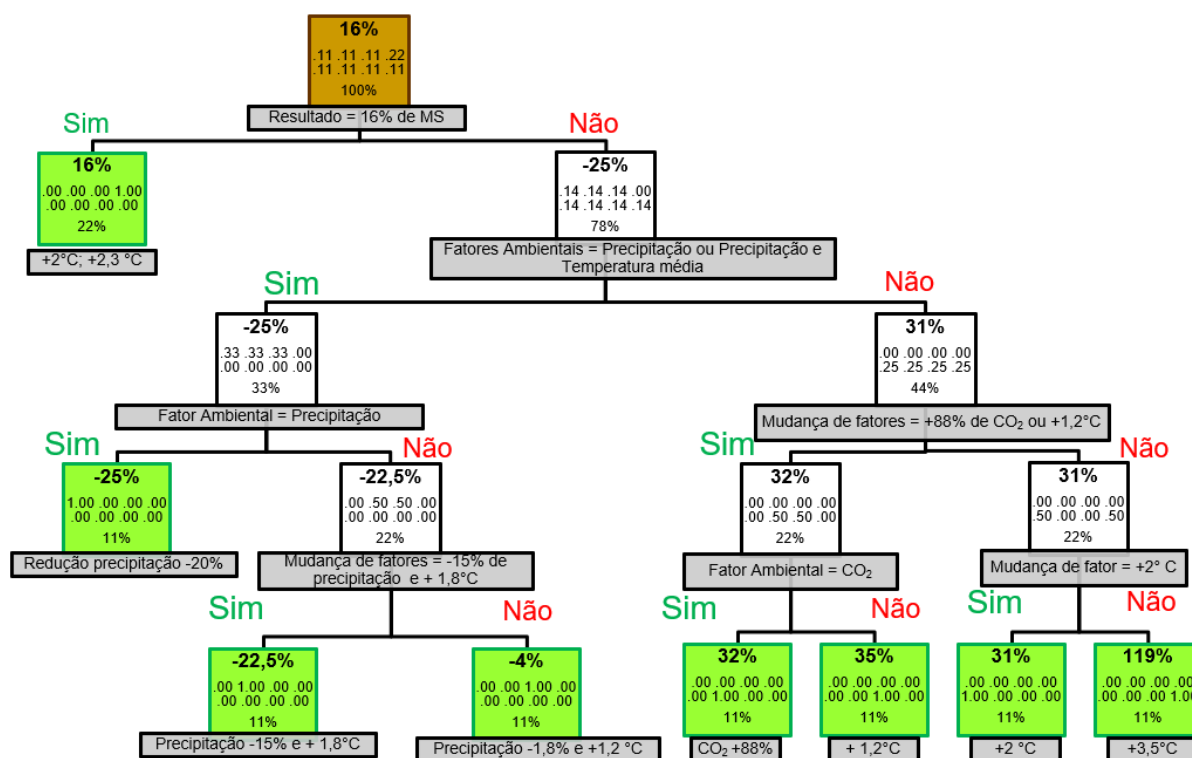


Figura 3. Árvore de decisão referente ao fichamento desmembrado das plantas C3. Resultado de incremento de produtividade de matéria seca (MS) (%). Fonte: Autor (2024).

* Nó em marrom representa o nó raiz, em branco representam os nós de decisão e os em verde, representam os nós terminais ou folhas. **Linhas de ramificação do lado esquerdo e com a palavra “Sim” indicam que o nó a seguir possui a característica descrita no nó de decisão ou raiz anterior, e as do lado direito que contenham e com a palavra “Não” indicam que o nó a seguir não possui a característica descrita no nó de decisão ou raiz anterior. *** Abaixo do acréscimo ou decréscimo percentual de matéria seca, constam 8 valores de probabilidade de que cada resultado (nó terminal) ocorra a partir desta decisão. A probabilidade de 1.00 indica que nestes casos, somente as “mudanças de fator” indicadas estão associadas a estes resultados. A árvore de decisão classifica o incremento de matéria seca (%) com base em dois conjuntos de variáveis: 1- Mudança dos fatores: indica mudanças em fatores climáticos e ambientais (seja em grau celsius ou percentual de variação). 2- Fatores Ambientais: especifica as condições ambientais (como disponibilidade de água, temperatura, e CO₂). Cada nó na árvore tem quatro elementos principais: 1- Condição: o critério de divisão. 2- Distribuição dos dados. 3- Probabilidade de cada classe de incremento de matéria seca para cada condição. 4- Classes de Resultados: categorias de incremento de matéria seca, como 16, -25, -4, etc.

Analisando cada linha para entender como as regras se aplicam na Figura 3, temos:

Linha do Resultado 16:

[.00 .00 .00 1.00 .00 .00 .00 .00]: Para um resultado de +16% de MS, nenhuma combinação ambiental específica é mencionada, sugerindo que esse resultado pode ocorrer isoladamente ou sob condições padrão.

Linha do Resultado -25:

[1.00 .00 .00 .00 .00 .00 .00 .00]: Quando o “Resultado” é -25% de MS, as condições Fatores Ambientais iguais a precipitação ou precipitação e temperatura média, e a condição de fator ambiental de somente precipitação estão associadas a esse resultado.

Linha do Resultado -22,5:

[.00 1.00 .00 .00 .00 .00 .00 .00]: Aqui, quando o “Resultado” é -22,5% de MS, a segunda condição se aplica, que envolve tanto o “fator ambiental” precipitação e temperatura média, quanto uma mudança nos fatores ambientais com uma redução de 15% na precipitação e aumento de 1,8 °C.

Linha do Resultado -4:

[.00 .00 1.00 .00 .00 .00 .00 .00]: Um resultado de -4% de MS está associado à terceira condição, porém com valores que não sejam iguais a -15% de precipitação e +1,8°C, também envolve precipitação e temperatura média, porém com uma mudança menor, sendo de -1,8% na precipitação e +1,2 °C.

Linha do Resultado 32:

[.00 .00 .00 .00 .00 1.00 .00 .00]: Quando o resultado é +32% de MS, ele está associado ao fator ambiental CO₂ e uma mudança nos fatores ambientais de +88% de CO₂.

Linha do Resultado 35:

[.00 .00 .00 .00 .00 .00 1.00 .00]: Um aumento de +35% de MS não está relacionado a mudança do fator CO₂ e sim a uma mudança nos fatores ambientais de +1,2°C.

Linha do Resultado 31:

[.00 .00 .00 1.00 .00 .00 .00 .00]: Um resultado de +31% de MS está associado à condição de aumento de temperatura média, com uma variação de +2°C.

Linha do Resultado 119:
[.00 .00 .00 .00 .00 .00 .00 1.00]: Um aumento de +119% de MS não está associado a um aumento de CO₂ mas sim ao de temperatura média com uma variação de +3,5°C.

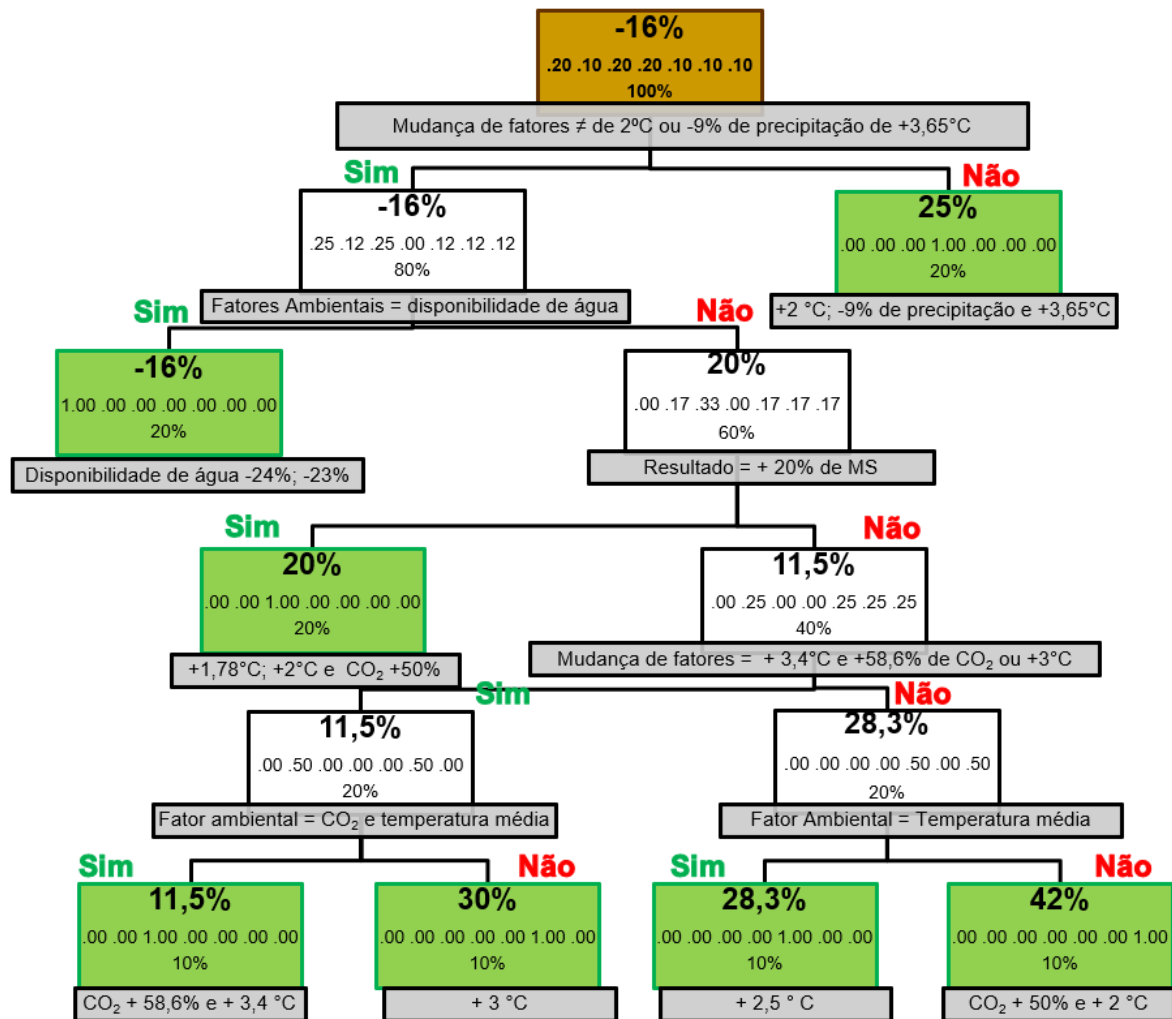


Figura 4 Árvore de decisão referente ao fichamento desmembrado das plantas C4. Resultado de incremento de matéria seca (MS) (%). Fonte: Autor (2024).

* Nó em marrom representa o nó raiz, em branco representam os nós de decisão e os em verde, representam os nós terminais ou folhas. **Linhas de ramificação do lado esquerdo e com a palavra “Sim” indicam que o nó a seguir possui a característica descrita no nó de decisão ou raiz anterior, e as do lado direito que contenham e com a palavra “Não” indicam que o nó a seguir não possui a característica descrita no nó de decisão ou raiz anterior. *** Abaixo do acréscimo ou decréscimo percentual de matéria seca, constam 7 valores de probabilidade de que cada resultado (nó terminal) ocorra a partir desta decisão. A probabilidade de 1.00 indica que nestes casos, somente as “mudanças de fator” indicadas estão associadas a estes resultados. A árvore de decisão classifica o incremento de matéria seca (%) com base em dois conjuntos de variáveis: 1- Mudança dos fatores: indica mudanças em fatores climáticos e ambientais (seja em grau celsius ou percentual de variação). 2- Fatores Ambientais: especifica as condições ambientais (como disponibilidade de água, temperatura, e CO₂). Cada nó na árvore tem quatro elementos principais: 1- Condição: o critério de divisão. 2- Distribuição dos dados. 3- Probabilidade de cada classe de incremento de matéria seca para cada condição. 4- Classes de Resultados: categorias de incremento de matéria seca, como -16, 11,5, 20, etc.

Analisando cada linha para entender como as regras se aplicam na Figura 4, temos:

Linha do Resultado 25:

[.00 .00 .00 1.00 .00 .00 .00 .00]: Um incremento de +25% ocorrem quando Mudança dos fatores é igual a -9% precipitação e +3,65°C ou +2°C.

Linha do Resultado -16:

[1.00 .00 .00 .00 .00 .00 .00 .00]: O decréscimo de -16% ocorre quando a mudança de fatores é -23% ou -24%, e o fator ambiental é “Disponibilidade de água”.

Linha do Resultado 20:

[.00 .00 1.00 .00 .00 .00 .00 .00]: Um incremento de 20% ocorre sob várias combinações de Mudança dos fatores (+50% CO₂ e +2°C ou + 1,78°C).

Linha do Resultado 11.5:

[.00 1.00 .00 .00 .00 .00 .00]: O incremento de 11,5%, ocorre quando a condição de resultado é diferente de +20%, a mudança de fatores é +3,4°C e +58,6 de CO₂ ou +3°C e quando o fator ambiental é igual a CO₂ e temperatura média.

Linha do Resultado 30:

[.00 .00 .00 .00 .00 1.00 .00]: O incremento de +30% ocorrem sob mudança de +3,4°C + 58,6% CO₂ ou +3°C, com "Temperatura média" como fator ambiental.

Linha do Resultado 28.3:

[.00 .00 .00 .00 1.00 .00 .00]: O incremento de +28,3% estão associados à mudança de +50% CO₂ e +2°C ou +2,5°C, com "Temperatura média" como fator ambiental.

Linha do Resultado 42:

[.00 .00 .00 .00 .00 .00 1.00]: Um incremento de +42% ocorrem sob condições de +50% CO₂ e +2°C ou +2,5°C, com "CO₂ e temperatura" como fator ambiental.

O modelo ainda indica que diferentes condições de mudança dos fatores e fatores ambientais levam a incrementos variados de matéria seca em plantas C4. A árvore reflete como as interações entre CO₂, temperatura e precipitação podem influenciar na produção de matéria seca.

A árvore indica que, com base nos valores de Fatores Ambientais, que podem ser precipitação ou temperatura média, o modelo decide o valor do resultado: Se Fatores Ambientais é Precipitação (-25%), o valor previsto é -11% de tonC/ha. Se Fatores Ambientais é Temperatura média (+4°C), o valor previsto é +7% de tonC/ha.

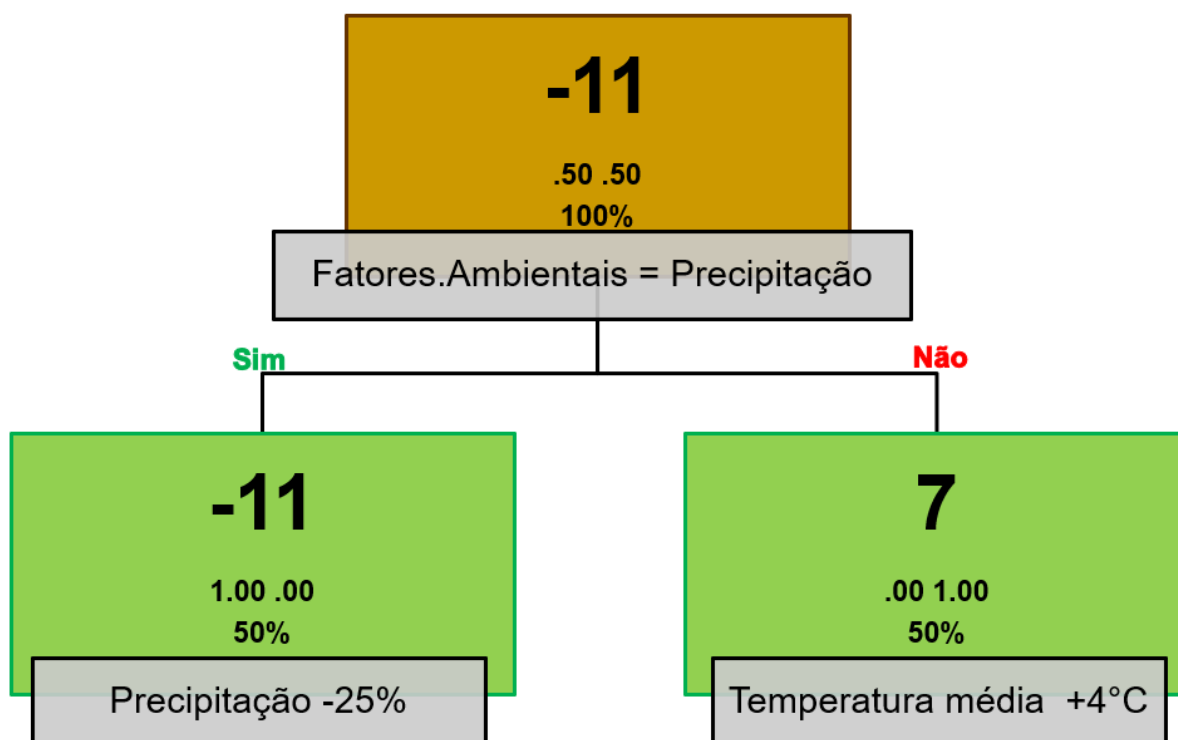


Figura 5 Árvore de decisão para as plantas C3 em incremento de Produtividade Primária Líquida por hectare. Fonte: Autor (2024).

* Nó em marrom representa o nó raiz e os em verde, representam os nós terminais ou folhas. **Linhas de ramificação do lado esquerdo e com a palavra "Sim" indicam que o nó a seguir possui a característica descrita no nó raiz anterior, e as do lado direito que contenham e com a palavra "Não" indicam que o nó a seguir não possui a característica descrita no nó de decisão ou raiz anterior. *** Abaixo do acréscimo ou decréscimo percentual de matéria seca, constam 7 valores de probabilidade de que cada resultado (nó terminal) ocorra para esta decisão. A probabilidade de 1.00 indica que nestes casos, somente as "mudanças de fator" indicadas estão associadas a estes resultados. *** Cada nó na árvore tem quatro elementos principais: 1-

Condição: o critério de divisão. 2- Distribuição dos dados. 3- Probabilidade de cada classe de incremento de matéria seca para cada condição. 4- Classes de Resultados: categorias de incremento NPP, de -11% e +7%.

7 DISCUSSÃO

A redução de precipitação para as plantas C3 culminou em sempre redução de produção de matéria seca (Figura 3), este resultado vai de encontro ao afirmado por Verslues *et al.* (2006), onde há redução de desenvolvimento de parte aérea com redução da disponibilidade de água em solo. Estes resultados corroboram também com os encontrados por De Mendonça, (2020), onde foram testados quatro genótipos de amendoim forrageiro em condições de estresse hídrico com suspensão de irrigação, e houve redução da massa seca de parte aérea entre 56,14% a 46,22% em todos os genótipos, quando comparados com tratamento irrigado. Existem também resultados indicando redução de 25,39% da produção de massa seca para *Gliricidia sepium* (LEÃO, 2006) e redução entre 20% a 62,21% para *Macroptilium* em condições de redução progressiva de água no solo (LIRA *et al.* 2023).

O mesmo padrão de redução de produção de matéria seca em condições de estresse hídrico encontrado nas plantas C3, também ocorreu nas C4 (Figura 4). Estudando também sobre o déficit hídrico, De Oliveira *et al.* (2022) encontrou redução progressiva da produção de matéria seca de diferentes linhagens de *P. maximum* ao reduzir os níveis de água no solo, no caso de massa seca foliar a redução ocorreu entre 14% e 50%, respectivamente para os níveis de água no solo de 20% e 60%. Outros autores como De Souza *et al.* (2024) e Righi *et al.* (2024) também observaram redução de matéria seca de folhas em diferentes cultivares de *P. maximum* em condições de estresse hídrico.

DA SILVA *et al.* (2024), em pesquisa com diferentes cultivares de *Brachiaria*, obtiveram também resultados com redução média de 46% na produção de matéria seca em condições de estresse hídrico caracterizado por 30% da capacidade de campo do solo. Resultados similares também foram encontrados por Gomes *et al.* (2023) e por Bonfim-Silva *et al.* (2014). De acordo com Tieszen e Detling, (1983), a água é o fator abiótico que isoladamente mais limita a produção vegetal, principalmente por a água ser fundamental para a taxa de expansão das células. Ainda segundo Alves *et al.* (2008) em condições de déficit hídrico, o número de folhas vivas de *B. decumbens*, é menor do que quando comparado com condições adequadas de água disponível.

Segundo Pilon *et al.* (2013), a seca, em condições leves ou moderadas, por levar a redução da disponibilidade de água, favorece o direcionamento de fotoassimilados para as

raízes favorecendo seu crescimento em busca de água em maiores profundidades, desta forma a parte aérea não é priorizada quanto ao recebimento de fotoassimilados.

Um dos trabalhos encontrou um acréscimo de produtividade de 119% para forrageiras C3, este resultado se destaca dos demais que ficaram entre -25% e +35%, isto pode ser explicado, por este trabalho considerar somente para um mês durante a primavera da França, diferente dos demais, que consideraram a produtividade ao longo de um ano. Na Europa a temperatura média histórica neste mês é abaixo da faixa ideal para as diversas forrageiras nativas C3 da região onde foi realizado o estudo. Neste período também não há limitação hídrica, visto que é um período chuvoso. Com o aumento da temperatura média para uma faixa ideal e sem restrição hídrica, as forrageiras em geral tendem a ter grandes respostas produtivas (BLOOR *et al.*, 2010).

No que se trata da elevação da temperatura média isoladamente ou associada também ao aumento da concentração do CO₂, onde é possível observar nas Figuras 3 e 4, que todos os trabalhos indicaram um aumento da produção de matéria seca. Trabalhando com *Stylosanthes capitata* Vogel, Viciado (2019) observou que em condições de disponibilidade de nutrientes e de água adequadas, o aumento em 2°C resultou em um aumento da biomassa foliar de aproximadamente 33%. Resultados similares de aumento de produção de matéria seca com aumento de 2°C também foram encontrados por Martinez *et al.* (2014) e Bovolato (2018). Newman *et al.* (2001) também obtiveram um aumento da produção de matéria seca de 11%, 12% e 26%, ao longo de três anos, com o aumento da temperatura média em 4,5°C.

Barboza (2014), indicou que o aumento da temperatura média em 2°C pode ocasionar a diminuição do limbo foliar, diminuição da proporção de parênquima lacunoso e mesófilo, e aumento da proporção de cutícula na face superior das folhas, podendo contribuir para o melhor desempenho fotossintético e conseqüentemente o crescimento das plantas. Segundo o mesmo autor, isso ocorre devido a diminuição somente do tamanho das células, e não redução em quantidade de células, portanto, aumentando os espaços intercelulares, reduzindo a difusão de CO₂ e possibilitando a atuação da enzima Rubisco em menores concentrações de CO₂.

Já para as plantas C4, em casos de somente elevação de temperatura média, em média a cada grau elevado, ocorreu o aumento de produção de matéria seca entre 10% a 12,5%. Lara (2007), avaliando diferentes cultivares de *Brachiaria* spp. estabeleceu um modelo correlacional de regressão, onde o aumento da taxa média de acúmulo de forragem foi proporcional ao aumento da temperatura média, variando entre 11,5% e 12,7% a cada grau de aumento da temperatura média. Tonato (2008), correlacionando a temperatura mínima média e taxa média de acúmulo de forragem de diferentes cultivares de *Panicum* spp., também observou acréscimos

entre 7,6% a 12,75% a cada grau elevado. Outros trabalhos com o objetivo de determinar temperaturas basais também podem ratificar esses resultados, como os de Moreno *et al.* (2014), Cruz *et al.* (2011) e Bortolin, (2016), enquanto Pedreira, (2011) apesar de também estimar aumento de produção de matéria seca, em seus modelos o aumento foi de 3,35% por grau elevado.

Segundo SÁNDOR *et al.* (2018), o aumento da temperatura média do ar, pode levar a um aumento da relação entre a massa seca de parte aérea e de raiz. Santos (2012), também observou algo similar, onde temperaturas intermediárias, com média de 26°C, ocorreu uma menor relação entre a parte aérea e a raiz, do que quando comparado a temperaturas médias de 29°C. Ainda segundo a autora, isso pode ser explicado por em temperaturas superiores, ocorrer a maior taxa de síntese e de senescência de tecidos, nestas condições os fotoassimilados tendem a ser direcionados para a parte aérea em detrimento a raiz.

O incremento da produção de matéria seca, em condições de aumento de temperatura média, foi similar tanto para as forrageiras C3, quanto para as C4. Fato que diverge do dito por Van Soest (1994), em que os efeitos da temperatura deveriam ser mais acentuados em gramíneas C4 do que nas C3, isso devido a taxa alta de crescimento típica das espécies C4.

Quanto ao aumento da concentração de CO₂, para as plantas C3, resultou também em um aumento de produção de matéria seca de 32%, resultado similar ao encontrado por Newman *et al.* (2001) que ao avaliarem a respostas de Amendoim forrageiro (*Arachis glabrata*) a um aumento da concentração de CO₂ de 94%, houve um aumento significativo de 25% na produção de matéria seca. Estes resultados corroboram com os encontrados por Xu *et al.* (2014) onde a elevação do CO₂ em 100% resultou em um incremento de massa seca entre 10,8–41,7% para uma leguminosa C3 de crescimento arbustivo, *Caragana microphylla*, e entre 33,2–52,3% para uma gramínea C3, *Stipa grandis*, em todos os tratamentos, seja com aumento de temperatura média e irrigação diferentes condições de irrigação.

Para as forrageiras C4, quando se trata do aumento da concentração de CO₂ e da temperatura média, os estudos apresentaram elevação da produção de matéria seca. Estes resultados corroboram com o encontrado por Bortolin (2016), onde ao elevar em 50% a concentração de CO₂ e em 2° C a temperatura média, observou um aumento de 15% da produção de matéria seca de *Panicum*. Diferente dos demais, Newman *et al.* (2001) não obtiveram diferença significativa ao elevar somente a concentração de CO₂ de 94% e observar a espécie *Paspalum notatum*.

Estes resultados controversos podem ser explicados pelo fato das plantas C4 possuírem o mecanismo de isolamento ao redor da enzima Rubisco que permite manter maior

concentração de CO₂, de forma a garantir a maior fixação do dióxido de carbono mesmo em concentrações ambientais mais baixas. Portanto, na presença de atmosfera com elevada concentração de CO₂ as plantas C4 tendem a refletir menores respostas. Porém, em condição de estresse hídrico, o aumento da concentração de CO₂ pode aliviar indiretamente o estresse pelo efeito da diminuição da condutância estomática e da redução da transpiração foliar (GHANNOUM, 2009). Segundo Morgan *et al.* (2011), o aumento da concentração atmosférica de CO₂ leva ao fechamento estomático nas plantas C4, deste modo, limitando a transpiração e economizando água.

Deste modo, em condições de estresse hídrico, mesmo as plantas C4 podem se beneficiar do aumento da concentração de CO₂ da atmosfera (LEAKEY, 2009). Fato que é mostrado no trabalho de Xu *et al.* (2014) que observou aumento de produção de matéria seca da gramínea C4, *Cleistogenes squarrosa*. Os incrementos foram de 20,0% e 69,7% nas temperaturas atuais, e de 33,2 e 59,0% com aquecimento de 6°C, respectivamente sob condições de seca moderada e severa

O sucesso na produção de forragem está intimamente ligado as condições abióticas, tornando assim vulnerável às mudanças no padrão climático (NOJOSA, 2019). Fato é que temperaturas médias e a concentração de CO₂ têm aumentado, consequentemente afetando o ciclo de crescimento das plantas. Visto que, a distribuição das chuvas tem se tornado mais irregular e imprevisíveis, resultando em impactos negativos na disponibilidade de água e, consequentemente, na produção de forrageiras (SILVA, 2021).

Se tratando da parte fenológica das forrageiras, seja germinação, florescimento ou frutificação, são dependentes dos fatores abióticos e climáticos. Não menos importante que a produção em quantidade, está também o valor nutritivo da forragem que é produzida. Este também pode sofrer influencia das mudanças climáticas, visto que os fatores abióticos influenciam na nutrição das plantas.

8 CONCLUSÃO

As previsões de mudança climática tendem para um aumento de temperatura média, aumento da concentração de CO₂ atmosférico e uma alteração em quantidade e distribuição de chuvas, com diferenças entre regiões. As evidências apresentadas revelam uma complexa interação entre os fatores climáticos e biológicos influenciam a produtividade das forrageiras, destacando a necessidade de abordagens multidisciplinares para enfrentar essas questões.

Fatores ambientais relacionados a água, temperatura e CO₂ influenciam diretamente na produtividade das forrageiras, sejam C3 ou C4. A redução da água, por disponibilidade ou precipitação, ocasiona em decréscimo de produtividade, enquanto elevação de temperatura média e de concentração de CO₂ tendem a elevar as produtividades.

A sustentabilidade da produção de forrageiras não pode ser alcançada sem uma compreensão aprofundada das interações ecológicas e climáticas, por meio do aprimoramento de modelos climáticos regionais e desenvolvimento de estudos interdisciplinares.

Por fim, utilizando uma abordagem integrada que combina pesquisa científica avançada, políticas públicas eficazes e práticas de manejo sustentável, é possível mitigar os impactos negativos e promover a resiliência do ecossistema envolvendo o uso de pastagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, L. H.; VALLE, R. R.; SHOEMAKER, C. O. Environmental influences on crop physiology. **Agricultural Sciences**, v. 32, n. 2, p. 156-167, 2011.
- ALVES, J. de S.; PIRES, A. J. V.; MATSUMOTO, M. P. de; RIBEIRO, G. S. Características morfológicas e estruturais da *Brachiaria decumbens* Stapf. submetida a diferentes doses de nitrogênio e volumes de água. *Acta Veterinaria Brasilica*, v.2, n.1, p.1-10, 2008.
- ANDRADE, C. M. S. de; ASSIS, G. M. L. de; FERREIRA, A. S. Eficiência de longo prazo da consorciação entre gramíneas e leguminosas em pastagens tropicais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA, 25., 2015, Fortaleza. Dimensões tecnológicas e sociais da Zootecnia: Anais..** Fortaleza: ABZ, 2015. 31 p.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SOUZA, C. M. Climate effects on agriculture in the context of increasing atmospheric CO₂. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 4, p. 235-247, 2019.
- ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 34, n. 100, p. 53-66, 2020.
- ASSAD, E. D. Sistemas agrícolas adaptados às mudanças climáticas. **Ciência e Cultura**, v. 73, n. 1, p. 35-40, 2021.
- ASSAD, E. D. *et al.* Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções.** Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 1, cap. 7, p. 213-228.
- ASSAD, E. D. *et al.* Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. In BUNGESTAB, D. J. (Eds.), **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta** (1ª ed., pp. 153-167). Brasília: Embrapa Cerrados, 2019.
- BARBOZA, A. **Impacto do aumento da concentração atmosférica de CO₂ e do aquecimento na anatomia foliar de duas espécies forrageiras tropicais C3 e C4.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2014. Acesso em: 10 nov. 2024.
- BARRETO, G. P.; *et al.* Avaliação de Clones de Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) e de um Híbrido com o Milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) Submetidos a Estresse Hídrico. **Revista Brasileira Zootecnia**, v.30, n. 1, p7-11, 2001.
- BERGAMASCHI, H. O clima como fator determinante da fenologia das plantas. **Fenologia: ferramenta para conservação, melhoramento e manejo de recursos vegetais arbóreos.** Colombo: Embrapa Florestas, v. 1, p. 291-310, 2007.
- BETTIOL, W. *et al.* **Aquecimento global e problemas fitossanitários.** 1. ed. Brasília, [s.n.].
- BISPO, G. L. **Fenologia e desempenho ecofisiológico de *Vasconcellea quercifolia* A. St.-Hill.** 2020. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Acesso em: 10 nov. 2024.

BLOOR, J. M. G. *et al.* Effects of warming, summer drought, and CO₂ enrichment on aboveground biomass production, flowering phenology, and community structure in an upland grassland ecosystem. **Ecosystems**, v. 13, p. 888-900, 2010.

BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, v.1, 308p. 2020.

BONFIM-SILVA, E. M. *et al.* Desenvolvimento e produção de capim-convert HD364 submetido ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agroambiente**, Boa Vista, v. 8, n. 1, p. 134-141, jan-abr. 2014. Disponível em: <https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/1437>. Acesso em: 08 nov. 2024.

BOURLIÈRE, F.; HADLEY, M.. Present-day savannas: an overview. In **Ecosystems of the world – tropical savannas** (D.W. Goodall, ed.). Elsevier, Amsterdam, 1983. p.1-17.

BOVOLATO, J. M. C. **Incremento de CO₂ e temperatura do ar no acúmulo e eficiência de uso de nutrientes em *Stylosanthes capitata* e *Panicum maximum* cultivadas em sistema MINI T FACE**. 2018. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Acesso em: 10 nov. 2024.

BRAGA, F. M. *et al.* Revisão: Crescimento de plantas C3 e C4 em resposta a diferentes concentrações de CO₂. **Research, Society and Development**, 2021.

BRANDSTETTER, E. V. *et al.* Protein and carbohydrate fractionation of Jiggs Bermudagrass in different seasons and under intermittent grazing by Holstein cows. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 41, 2019

BUENO RUBIAL, M. del P. El Acuerdo de París: ¿una nueva idea sobre la arquitectura climática internacional?. **Relaciones Internacionales**, Madrid, España, n. 33, p. 75–95, 2016. Disponível em: <https://revistas.uam.es/relacionesinternacionales/article/view/6728>. Acesso em: 18 maio. 2024.

CAMOZZI, I. V. B. *et al.* **O financiamento do agronegócio: avaliação comparativa entre os modelos de crédito utilizados no estado de Goiás**. 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração) - Faculdades Alves Faria, 2017

CRUZ, P. G. da *et al.* Modelos empíricos para estimar o acúmulo de matéria seca de capim-marandu com variáveis agrometeorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 675-681, 2011.

CULLEN, B. *et al.* change impacts and adaption strategies for pasture-based industries: Australian perspective. **University of Tasmania**. 2021.

DA SILVA, A. J. *et al.* Resposta produtiva e morfológica de cultivares de *Urochloa* spp. ao déficit hídrico. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 6231–6248, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.1-375. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/3880>. Acesso em: 15 nov. 2024.

DE ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; ALVES, F. V. **Carne carbono neutro: um novo conceito para carne sustentável produzida nos trópicos**. 2015.

DE MENDONÇA, M. S. **Respostas agronômicas e fisiológicas de genótipos de amendoim forrageiro submetidos ao déficit hídrico**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2020.

DE SOUZA, E. M. B. *et al.* **Avaliação e seleção de híbridos de *Megathyrsus maximus* em relação a produtividade de forragem, valor nutritivo e tolerância ao estresse hídrico**. 2024. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

DIAS FILHO, M. B. *et al.* Digestibilidade in vitro da matéria orgânica e teor de proteína bruta em *Panicum maximum* Jacq. cv. Tobiata sob estresse hídrico. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.26, n.10, p.1725-1729, 1991.

DIAS-FERREIRA, C. **Ecologia das alterações globais**. Alterações fenológicas: texto de apoio. 2023.

DICK, M. *et al.* Redução da área de pastagens e das emissões de gases de efeito estufa na produção de carne bovina brasileira no século XXI. In: **Jornada NESPRO (10.: 2015: Porto Alegre, RS). Anais. Porto Alegre, RS: NESPRO/UFRGS, 2015.**, 2015.

DOS ANJOS, A. F.; DA SILVA, E. B. Determinantes climáticos da concentração espacial da pecuária no Brasil. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 681–692, 2023. Disponível em: <https://ojs.southfloridapublishing.com/ojs/index.php/rccs/article/view/2707>. Acesso em: 14 maio. 2024.

DUNN, R. J. H. *et al.* (Ed.). Global Climate. In: BLUNDEN, J., T. B *et al.* State of the Climate in 2022. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 104 (9), 2023.

EMATER-MG. **Mexpar 4.0**: Ater digital conectando pessoas. Belo Horizonte, 2020. Disponível em: https://www.emater.mg.gov.br/doc/covid_cartilhas/mexpar.pdf. Acesso em: 05 nov. 2024.

FIGUEIREDO, M. M. **O impacto dos princípios ambientais, sociais e governamentais na realização do direito fundamental à habitação e na promoção de um meio ambiente ecologicamente equilibrado: um estudo de caso da BSPAR Incorporações**. 2024. Dissertação (Mestre em Direito). Centro universitário Christus. FORTALEZA. 2024

FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Drought inhibition of photosynthesis in plants. **Functional Plant Biology**, v. 29, n. 11, p. 1193-1205, 2002.

FRANCISCO, M. M. **Assessing vulnerability to sea level rise in the state of São Paulo, Brazil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2018.

GHANNOUM, O. C4 photosynthesis and water stress. **Annals of Botany**, v. 103, n. 4, p. 635–644, 2009.

GIL, A. C. **COMO ELABORAR PROJETOS DE PESQUISA**. 7ª Edição. Barueri -SP: Atlas, 2022. p. 208.

GOIS, D. V. **Cenários de risco à desertificação no semiárido sergipano**. 2020. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2020

GOMES, L. D. *et al.* Tolerância de híbridos de braquiária ao estresse hídrico. **Scientific Electronic Archives**, Rondonópolis, v. 16, n. 10, p. 1-7, set. 2023. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/SEA/article/view/1792>. Acesso em: 15 nov. 2024

GUIMARÃES, M. A. D. *et al.* Experiências e perspectivas no uso de frutíferas em sistemas integrados. **Seven Editora**, [S. l.], 2023. Disponível em: <https://sevenpublicacoes.com.br/editora/article/view/2299>. Acesso em: 08 nov. 2024.

GUINCHO, M. A. B. L. **O Impacto das Alterações Climáticas no Aumento dos Fluxos Migratórios para a Europa: O Caso do Saara e do Sahel**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho (Portugal).

HABERMANN, E. *et al.* Increasing atmospheric CO₂ and canopy temperature induces anatomical and physiological changes in leaves of the C4 forage species *Panicum maximum*. **PLoS ONE**, 14, 2, 1-25. 2019a.

HABERMANN, E. *et al.* Warming and water deficit impact leaf photosynthesis and decrease forage quality and digestibility of a C4 tropical grass. **Physiologia Plantarum**, 165: 383-402. 2019b.

HARRISON, E. L. *et al.* The influence of stomatal morphology and distribution on photosynthetic gas exchange. **The Plant Journal**, 101, 4, 768-779. 2019.

HARRISON, M. T.; CULLEN, B.R.; RAWNSLEY, R. P. Modelling the sensitivity of agricultural systems to climate change and extreme climatic events. **Agricultural Systems**, v. 148, p. 135-148, 2016.

IPCC. **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.

IPCC. **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, Switzerland. p. 184. 2023.

LARA, M. A. S. **Respostas morfofisiológicas de cinco cultivares de *Brachiaria* spp. às variações estacionais da temperatura do ar e do fotoperíodo**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. doi:10.11606/D.11.2007.tde-03082007-141531. Acesso em: 10 nov. 2024

LEAKEY, A. D.B. Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. Proceedings. Biological Sciences. **The Royal Society**, v. 276, n. 1666, p. 2333–2343, 2009.

LEÃO, D. A. S. **Estresse hídrico e adubação fosfatada no desenvolvimento inicial e na qualidade da forragem da gliricídia (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.) e do sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.)**. 2006. 71 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Centro de Saúde e Tecnologia Rural, Universidade Federal

de Campina Grande, Patos, Paraíba, Brasil, 2006. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2914>

LEMAIRE, G.; CHAPMAN, D.F. Tissue flows in grazed plant communities. In: HODGSON, J., ILLIUS, A.W. (E.E.). **The ecology and management of grazing systems**. CAB International. Oxon. pp.3-36. 1996.

LIRA, I. C. de S. A. *et al.* Tolerância de germoplasma de *Macroptilium* ao déficit hídrico. **Peer Review**, v. 5, n. 6, 2023. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1154578>. Acesso em: 15 nov. 2024.

MANZATTO, C. V. *et al.* **Mitigação das emissões de gases de efeitos estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC: estimativas parciais**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. (Documentos / Embrapa Meio Ambiente, 1516-4691; 122).

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINEZ, C. A. *et al.* Moderate warming increases PSII performance, antioxidant scavenging systems and biomass production in *Stylosanthes capitata* Vogel. **Environmental and Experimental Botany**, v. 102, p. 58-67, 2014.

MILES, J. W. Apomixis for cultivar development in tropical forage grasses. **Crop Science**, v. 47, p. S-238-S-249, 2007.

MOORE, C. E. *et al.* The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: from enzymes to ecosystems. **Journal Of Experimental Botany**, 72, 8, 2822-2844. 2021.

MORENO, L.S. B. *et al.* Base temperature determination of tropical *Panicum* spp. grasses and its effects on degree-day-based models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 186, p. 26-33, 2014.

MORGAN, J. A. *et al.* C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland. **Nature**, v. 476, n. 7359, p. 202-205, 2011.

MOURA, F. de B. P.; SILVA, J. V. **Restauração na caatinga 2**. Editora da Universidade Federal de Alagoas, 2021.

NASCIMENTO, D. T. F.; NOVAIS, G. T. Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. **Rev. De Geogr**, v. 9, 2020.

NERY, L. M. **Proposta metodológica para a transferência da tecnologia ILPF em pastagens, transferência do conhecimento e informação técnica para produtores rurais**. 2021. Dissertação (Mestrado Biotecnologia e Monitoramento Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba-SP, 2021.

NEWMAN, Y. C. *et al.* Carbon dioxide and temperature effects on forage dry matter production. **Crop Science**, v. 41, n. 2, p. 399-406, 2001.

NOBRE, C. *et al.* As Metrôpoles brasileiras no contexto das mudanças climáticas: entrevista com Carlos Nobre. In: COSTA, Marco Aurelio (ed). 50 Anos de Regiões Metropolitanas no Brasil e a Política Nacional de Desenvolvimento Urbano: No Cenário De Adaptação das

Cidades às Mudanças Climáticas e à Transição Digital. **Editora IPEA**, Brasília. 2024. <https://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-068-4>

NOJOSA, T. C. de S. **Estratégias de convivência com o semiárido: o caso do assentamento 25 de maio, Madalena - Ceará**. 2019. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

NUNES, M. S. O Brasil no Acordo de Paris sobre Mudanças Climáticas um estudo sobre o cumprimento das metas de redução de emissões no setor de energia. **Editora Licuri**, p. 1-47, 2022.

OKEREKE, C.; COVENTRY, P. Climate justice and the international regime: before, during, and after Paris. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, n 7(6), p. 834–851, 2016.

DE OLIVEIRA, E. M. *et al.* Evaluation of *Megathyrus maximus* genotypes under water stress conditions. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, v. 44, p. e54975, 2022.

PARENTE, L. *et al.* Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, 2019.

PEDREIRA, B. C. *et al.* Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. **Field Crops Research**, v. 120, n. 3, p. 370-379, 2011.

PEDREIRA, C. G. S.; TONATO, F. Bases ecofisiológicas para o manejo de gramíneas do gênero *Cynodon*. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, Viçosa. **Anais**. UFV; DZO, 2006. p. 93-115.

PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. Q.; MARIN, F. R. Mudanças Climáticas Globais e a Agricultura no Brasil. **Revista Multiciência**. Campinas, SP. nº 8. p. 138 – 162, 2007.

PEZZOPANE, J. R. M. *et al.* *Panicum maximum* cv. Tanzânia: climate trends and regional pasture production in Brazil. **Grass and Forage Science**, v. 72, n. 1, p. 104-117, 2017.

PIEDADE, M. T. F. *et al.* Os campos naturais e as plantas herbáceas na planície de inundação amazônica e sua utilização. **Desafios para um Manejo Sustentável**, p. 87, 2020.

PILON, R. *et al.* Grassland root demography responses to multiple climate change drivers depend on root morphology. **Plant and Soil**, v. 364, p. 395-408, 2013.

PLAUTZ, N. **Os direitos dos agricultores tradicionais e familiares no Brasil e a conservação da agrobiodiversidade on farm**. 2022. Dissertação (Mestrado em Direito) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2022

PRADO, C. H. B. de A. *et al.* Leaf dynamics of *Panicum maximum* under future climatic changes. **PLoS One**, PLoS ONE 11(2): e0149620. 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149620>

Projeto MapBiomias - **Coleção 8 da Série Anual de Mapas da Cobertura e Uso do Solo do Brasil**, acessado em 13 de maio de 2024 através do link: <https://brasil.mapbiomas.org/mapa-mural/>

R CORE TEAM. R: A **Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. 2024. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 18 de outubro de 2024.

RIGHI, R. S. M. *et al.* TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE *Megathyrsus maximus* AO ESTRESSE HÍDRICO. **Nativa**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 249–254, 2024. DOI: 10.31413/nat.v12i2.15729. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/15729>. Acesso em: 15 nov. 2024.

ROJAS-DOWNING, M. M. *et al.* Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. **Climate risk management**, v. 16, p. 145-163, 2017.

SÁNDOR, R. *et al.* Plant acclimation to temperature: developments in the pasture simulation model. **Field Crops Research**, v. 222, p. 238-255, 2018.

SANO, E. E. *et al.* Características gerais da paisagem do Cerrado. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 1, cap. 7, p. 213-228.

SANTANA, C. A. M. *et al.* Cerrado: pilar da agricultura brasileira. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. **Dinâmica agrícola do Cerrado: análises e projeções**. Brasília: Embrapa, 2020, p. 37-58.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. DE. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 115–123, fev. 2010.

SANTOS, E. A; SILVA; D. S; QUEIROZ FILHO, J. L. . Composição Química do Capim-Elefante cv. Roxo Cortado em Diferentes Alturas. **Revista Brasileira Zootecnia**, v.30, p.18-23, 2001.

SANTOS, M. S. **Estudo do comportamento não estacionário das vazões no rio Paraguai: detecção, atribuição e previsão de cheias**. 2019. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SANTOS, P. M. *et al.* **Produção animal no Brasil: caracterização, simulação de cenários para pastagens e alternativas de adaptação às mudanças climáticas**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 99 p. 2015.

SANTOS, P. da S. **Sistemas produtivos intensivos da pecuária de corte de Mato Grosso do Sul: conjunto de indicadores de avaliação da sustentabilidade**. 2022. Tese (Doutorado em Administração) – Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande-MS, 2022.

SANTOS, R. M. **Germinação, respostas produtivas ao incremento da temperatura do ar e CO₂ e zoneamento climático do capim-buffel**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus de Ciências Agrárias, PE, 2012.

SCHIPPERS, J. H. M., *et al.* Living to die and dying to live: The survival strategy behind leaf senescence. **Plant Physiology**, 169, 2, 914-930. 2015.

SILVA, A. S. da. **Impactos ambientais da ocupação na paisagem do Projeto Lagoa Grande no município de Janaúba-MG**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Montes Claros, Montes Claros-MG, 2021.

SILVA, F. A. M. da; *et al.* Uso do modelo STICS para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a produção de grãos de milho no cerrado brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 19, 2015, Lavras. **Agrometeorologia no século 21: o desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros: anais**. Lavras: Ed. UFLA, 2015a. p. 407-417.

SILVA, V. J. da; *et al.* Características desejáveis em plantas forrageiras. In: BASTOS, SANTOS, M. V. F. dos; NEIVA, J. N. M. (ed). **Culturas forrageiras no brasil: uso e perspectivas**. Livro Eletrônico. Visconde do Rio Branco, MG: Suprema Gráfica, 2022. p. 09-34. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1162189/1/Capimurocloa-alternativa-para-regiao-semiarida.pdf>. Acesso em: 21 maio. 2024.

SOUSA, T. B. **Pelos chãos do ecótono Cerrado–Caatinga: os modos de vida camponês e a salvaguarda da socioagrobiodiversidade no Sudoeste do Piauí**. 2023. Dissertação (mestrado) — Universidade de Brasília, Faculdade UnB Planaltina, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural, 2023.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MOLLER, I.M., MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**, 6ª edição. Artmed, São Paulo, Brasil. 2017.

TAIZ, L; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.

TIESZEN, L.L.; DETLING, J.K. Productivity of grassland and tundra. In: Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., Ziegeler, H. (Eds.). **Encyclopedia of plant physiology**. Ecosystem processes: mineral cycling, productivity and man's influence. Springer-Verlag. Berlin. Vol. 12 D. pp. 173-203. 1983

TONATO, F. **Desenvolvimento e avaliação de modelos preditores de acúmulo de forragem em pastagens tropicais para apoio à tomada de decisão**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

TUBIELLO, F. N.; SOUSSANA, J. F.; HOWDEN, S. M. Crop and pasture response to climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 50, p. 19686-19690, 2007.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)**. Nairobi. 2023.

VAN SOEST, P. J. **Nutritional ecology of the ruminant**. New York, 476 p. 1994,

VERSLUES, P. E. *et al.* Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, v. 45, n. 4, p. 523-539, 2006.

VICIEDO, D. O. **Warming and water deficit impact the nutritional performance of a C4 and C3 tropical grass**. 2019. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Acesso em: 10 nov. 2024.

WANG, J. et al. Changes in grain protein and amino acids composition of wheat and rice under short-term increased [CO₂] and temperature of canopy air in a paddy from East China. **The New phytologist** vol. 222,2, p. 726-734. 2019. doi:10.1111/nph.15661

WEICHERT, R. F. **CERRADO EM DESTAQUE: O PAPEL VITAL DO CERRADO NA BIODIVERSIDADE DO PLANETA**. 2024. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São João del-Rei.

YAMORI, W., HIKOSAKA, K., WAY, D.A. Temperature response of photosynthesis in C₃, C₄, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. **Photosynthesis research**, 119, p. 101-117. 2014.

Xu, Z., *et al.* Effects of elevated CO₂, warming and precipitation change on plant growth, photosynthesis and peroxidation in dominant species from North China grassland. **Planta** **239**, p.421–435.2014.