



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
CAMPUS PETROLINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

FELIPE MORAIS DE BARROS

**BALANÇO DE NUTRIENTES NA CULTURA DO SORGO EM SISTEMAS DE
CULTIVO**

PETROLINA

2024

FELIPE MORAIS DE BARROS

BALANÇO DE NUTRIENTES NA CULTURA DO SORGO EM SISTEMAS DE
CULTIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco *Campus* Petrolina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador(a): Dra Diana Signor Deon

Coorientador(a): Dra. Francislene Angelotti

Coorientador(a): Dra. Alessandra Monteiro
Salviano

PETROLINA

2024

Barros, Felipe Morais de. .

B277b Balanço de nutrientes na cultura do sorgo em sistemas de cultivo / Felipe Morais de Barros. - Petrolina:
do autor, 2024.
98p.: PDF.

Orientadora: Profa. Dra. Diana Signor Deon.

Coorientadora: Dra. Francislene Angelotti.

Coorientadora: Dra. Alessandra Monteiro Salviano.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental para o
Semiárido, Universidade de Pernambuco Campus Petrolina, Petrolina-PE, 2024.

1. Consórcio gramínea - leguminosa. 2. Produção - biomassa. 3. semiárido.
I. Deon, Diana Signor. II. Angelotti, Francislene. III. Salviano, Alessandra Monteiro. IV. Universidade de
Pernambuco- Campus Petrolina -PPGCTA. III. Título.

CDD-634.173

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária, Maria Gorete Pereira e Silva CRB4/0796.

Universidade de Pernambuco - Campus Petrolina.

FELIPE MORAIS DE BARROS

BALANÇO DE NUTRIENTES NA CULTURA DO SORGO EM SISTEMAS DE
CULTIVOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco *Campus* Petrolina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Aprovada em: 09/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Francislene Angelotti (Coorientadora)
Universidade de Pernambuco *Campus* Petrolina (UPE)
Embrapa Semiárido

Prof. Dr. Hiram Marinho Falcão (Membro interno)
Universidade de Pernambuco *Campus* Petrolina (UPE)

Profa. Dra. Ana Paula Guimarães Santos (Membro externo)
Embrapa Semiárido

PETROLINA

2024

Dedico este trabalho aos meus pais, esposa e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Em um momento como esse, pensamos nas pessoas que, de alguma forma, estiveram presentes na construção do que hoje celebramos, e sendo assim, conforta-nos em saber que cada etapa teve seu valor, seu suor, mas, sobretudo seu incentivo.

Agradeço primeiramente a Deus, por me presentear com a mais bela e prazerosa sensação de existência.

A minha insubstituível Mãe, que pisou em cada pegada que deixei e jamais me deixou olhar para trás.

Ao meu grandioso Pai, que por vezes, sem saber, aniquilou os fantasmas que oprimia os meus sonhos com o seu exemplo de luta e simplicidade de coração.

Aos meus irmãos, Livia Barros, Alexandre Barros, Ricardo Barros, Juliana Barros, Davi Barros, Mariana Barros, Marta Barros e Petrucio Barros, cujo convívio me proporciona momentos inesquecíveis.

A minha orientadora, a Dr^a Diana Signor Deon, não apenas pela sua referência inquestionável de intelectualidade e profissionalismo, mas sobretudo pelos valores humanos tão necessários.

As minhas coorientadoras, Dr^a Francislene Angelotti e Dr^a Alessandra Salviano pelas contribuições irretocáveis ao longo deste projeto.

À minha querida esposa Stephane Gomes por entender minha ausência e por vezes, meu foco.

Aos amigos de sala de aula e de trabalho, por suas ações de generosidade e incentivo.

A Embrapa Semiárido, em especial a equipe do laboratório de mudanças climáticas, do laboratório de solo e a equipe de funcionários do Campo Experimental da Caatinga.

A universidade de Pernambuco – *Campus Petrolina* por oportunizar a realização deste curso, bem como ao corpo docente do PPGCTA, por vezes, tão diverso e ao mesmo tempo tão necessário.

Por fim, agradeço a Ciência, por seu aspecto fascinante de se reinventar e de nos oferecer os mais variados objetos de estudos.

“Se algum de vocês tem falta de sabedoria, peça-a a Deus, que a todos dá livremente, de boa vontade; e lhe será concedida”
(TIAGO 1:5)

RESUMO

Os sistemas agrícolas consorciados entre leguminosas e gramíneas possibilitam a adoção de estratégias eficazes para a melhoria da qualidade do solo e nutrição de planta, bem como se constituem em um instrumento para a promoção de uma agricultura sustentável conferindo maior resiliência às mudanças climáticas. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o efeito do consórcio sorgo-feijão sobre o balanço de nutrientes na cultura do sorgo em condições de cultivos no semiárido brasileiro. O experimento foi realizado em um Argissolo Vermelho-Amarelo do Campo Experimental Caatinga, pertencente à Embrapa Semiárido, em Petrolina – PE em duas épocas de plantio distintas (junho e dezembro). Foram utilizados duas cultivares de sorgo biomassa (BRS716 e Agri002e) e quatro cultivares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) (BRS Itaim, BRS Gurgueia, BRS Guariba e BRS Carijó). O sorgo biomassa foi cultivado separadamente em monocultivo e consorciados com os diferentes tipos de feijão-caupi, distribuídos em 10 tratamentos com três repetições cada. Foram realizadas análises químicas do solo antes e depois de cada ciclo de cultivo, bem como a quantificação dos nutrientes aportados ao solo por meio da água de irrigação, precipitações pluviométricas e fertilização mineral. Por sua vez, foram analisadas as exportações e acúmulos dos nutrientes nas plantas de sorgo, especificamente nas folhas, colmos e panículas. Todos os macronutrientes analisados (P, K, Ca e Mg) apresentaram balanços positivos tanto nos tratamentos solteiros quanto nos tratamentos consorciados. Entre os micronutrientes analisados (Fe, Zn, Mn e Cu), apenas o Cu apresentou balanço negativo no primeiro ciclo de cultivo, enquanto os outros apresentaram balanços positivos em todos os ciclos de cultivos. A recomendação de adubação, os estoques iniciais de nutrientes no solo, a água de irrigação e a água de chuva afetaram diretamente os balanços dos nutrientes. Quando comparados entre sistemas de cultivos, as cultivares de sorgo biomassa BRS716 e Agri002e apresentaram os maiores balanços de nutrientes em sistemas consorciado com o feijão-caupi e, além disso, a cultivar de sorgo biomassa BRS716 apresentou, no geral, os maiores balanços de nutrientes em comparação com a cultivar Agri002e.

Palavras-chave: Consórcio gramínea-leguminosa; Produção de biomassa; semiárido.

ABSTRACT

Intercropping systems between legumes and grasses allow the adoption of effective strategies to improve soil quality and plant nutrition, as well as constituting an instrument for promoting sustainable agriculture, providing greater resilience to climate change. The objective of this research was to evaluate the effect of sorghum-bean intercropping on the nutrient balance of sorghum crops under cultivation conditions in the Brazilian semiarid region. The experiment was carried out in a Red-Yellow Argisol of the Caatinga Experimental Field, belonging to Embrapa Semiárido, in Petrolina - PE, in two different planting seasons (June and December). Two biomass sorghum cultivars (BRS716 and Agri002e) and four cowpea cultivars (*Vigna unguiculata* L. Walp) (BRS Itaim, BRS Gurgueia, BRS Guariba and BRS Carijó) were used. Biomass sorghum was grown separately in monoculture and intercropped with different types of cowpea, distributed in 10 treatments with three replicates each. Chemical analyses of the soil were performed before and after each crop cycle, as well as the quantification of nutrients supplied to the soil through irrigation water, rainfall and mineral fertilization. In turn, the export and accumulation of nutrients in sorghum plants, specifically in leaves, stems and panicles, were analyzed. All macronutrients analyzed (P, K, Ca and Mg) showed positive balances in both single and intercropped treatments. Among the micronutrients analyzed (Fe, Zn, Mn and Cu), only Cu showed a negative balance in the first crop cycle, while the others showed positive balances in all crop cycles. Fertilization recommendations, initial nutrient stocks in the soil, irrigation water and rainwater directly affected the nutrient balances. When compared between cropping systems, the biomass sorghum cultivars BRS716 and Agri002e presented the highest nutrient balances in systems intercropped with cowpea and, in addition, the biomass sorghum cultivar BRS716 presented, in general, the highest nutrient balances compared to the cultivar Agri002e.

Keywords: Grass-legume consortium; Biomass production; semiarid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Temperatura máxima (Tmax (°C), Temperatura mínima (Tmin (°C), Precipitação (Prec (mm)) e ciclo do sorgo biomassa e feijão-caupi (plantio à colheita) de duas épocas de plantio (Época 1: junho) e (Época 2: dezembro) de 2022.....	35
Figura 02 – Arranjo das Parcelas na área experimental.....	37
Figura 03 – Balanço de Macronutrientes no sorgo no primeiro ciclo de cultivo (30/06/2021 a 27/09/2021).....	57
Figura 04 – Balanço de Macronutrientes no sorgo no segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022).....	58
Figura 05 – Balanço de Micronutrientes do sorgo no primeiro ciclo de cultivo (30/06/2021 a 27/09/2021).....	64
Figura 06 – Balanço de Micronutrientes no sorgo no segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022).....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Tratamentos utilizados no experimento.....	36
Tabela 02 – Caracterização do solo, na camada de 0 a 20 cm, antes da implantação do experimento no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina-PE.....	37
Tabela 03 – Nutrientes aplicados via fertilização nos ciclos de cultivos I e II de sorgo e feijão-caupi, em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina – PE.....	38
Tabela 04 – Estoque inicial de nutrientes (média) no solo no primeiro ciclo de cultivo (30/06/2021 a 27/09/2021) em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina PE.....	44
Tabela 05 – Estoque de nutrientes (média $\pm$ erro padrão) no solo no início do segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022) em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em PetrolinaPE.....	46
Tabela 06 – Aporte de nutrientes pela água de irrigação nos ciclos I e II de cultivos de sorgo, em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina-PE.....	48
Tabela 07 – Aporte de nutrientes pela água da chuva nos ciclos I e II de cultivos de sorgo e feijão-caupi, em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina-PE.....	49
Tabela 08 – Exportação de nutrientes pela planta de sorgo (média $\pm$ erro padrão) no final do ciclo I em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina-PE.....	50
Tabela 09 – Exportação de nutrientes pela planta de sorgo (média $\pm$ erro padrão) no final do ciclo II em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina-PE.....	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2.1	Objetivos específicos.....	15
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
3.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEGURANÇA ALIMENTAR.....	16
3.1.1	Panorama climático e conceitos gerais.....	16
3.1.2	Cenários.....	19
3.1.3	Impactos na agricultura.....	20
3.1.4	Sistemas resilientes às mudanças climáticas.....	22
3.2	SISTEMAS CONSORCIADOS ENTRE GRAMÍNEAS E LEGUMINOSAS E O BALANÇO DE NUTRIENTES.....	25
3.3	DINÂMICA DOS NUTRIENTES NO SISTEMA SOLO-PLANTA.....	30
4	MATERIA E MÉTODOS.....	35
4.1	IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO NO CAMPO.....	35
4.2	COLETA E ANÁLISE DO SOLO.....	38
4.3	COLETA E ANÁLISE DAS PLANTAS.....	39
4.4	CÁLCULO DO BALANÇO DE NUTRIENTES.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
6	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70
	ANEXOS.....	92

1 INTRODUÇÃO

A mudança climática é o maior e mais complexo problema ambiental que a humanidade enfrenta atualmente (SALAMOVA et al., 2023). As temperaturas médias do planeta estão aumentando a níveis nunca antes observados pela ciência e o principal fator impulsionador desse aumento é a ação predatória do homem sobre os recursos naturais (IPCC, 2022). Dados do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC) revelam em seu sexto relatório, que se as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) continuarem a aumentar nas mesmas proporções que a taxa atual, o aquecimento global provavelmente aumentará 1,5°C entre 2030 e 2052, afetando diretamente todas as relações ambientais da terra.

Neste sentido, a agricultura, por se constituir em uma atividade que depende diretamente dos elementos climáticos, torna-se muito vulnerável a essas mudanças (LIAQAT et al, 2022), uma vez que a temperatura e a precipitação têm efeito direto sobre a fisiologia das plantas, a fertilidade dos solos, a disponibilidade de água etc. (CORREIA et al., 2022)

Para o contexto envolvendo o semiárido e sua vulnerabilidade frente ao aumento das temperaturas atmosférica globais, é crucial implementar estratégias de adaptação bem como desenvolver práticas agrícolas mais resilientes como o uso de sistemas agrícolas consorciados, culturas regionalmente adaptadas, manejo eficiente do solo, gestão sustentável dos recursos hídricos e a adoção de práticas conservacionistas do próprio bioma (ALVES et al., 2022). As ações de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas devem ser instituídas dentro de uma visão integrada que consiga aumentar a diversidade de atores e as abordagens de mitigação (ANGELOTTI et al., 2015; ANGELOTTI; GIONGO, 2019; IPCC, 2022).

Os sistemas agrícolas consorciados, principalmente gramíneas e leguminosas que são os mais utilizados na agricultura (SEMAHEGN, 2022), desempenham um papel fundamental dentro de um contexto de vulnerabilidade climática, pois ao passo que aumentam a diversidade de cultura em uma mesma área, proporcionam a otimização da utilização dos nutrientes presentes no solo, promovendo ciclos mais eficientes desses nutrientes, melhorando a própria estrutura do solo, além de conferir ao sistema solo-planta uma maior resiliência e, assim, contribuindo para uma produção agrícola sustentável (BEZERRA, 2022; MA, 2023).

Ao relacionar os sistemas consorciados com a fertilidade do solo, considerando a exportação dos nutrientes pelas plantas e os estoques disponíveis no solo após as colheitas, é importante um olhar mais atento e estratégico, não apenas para o papel da adubação, mas

também para o balanço dos nutrientes (KORITSCHONER et al., 2023). Sendo assim é fundamental manter o equilíbrio entre as entradas e saídas de nutrientes no sistema solo-planta (KULKARNI; GOSWAMI, 2019), uma vez que balanços negativos ou excessivamente positivos podem afetar, no médio e longo prazo, tanto a sustentabilidade dos sistemas agrícolas em si, quanto a do ambiente como um todo (BHATTACHARYYA et al., 2021; RAWAL et al. 2022).

Assim, avaliar o balanço de nutrientes nesses sistemas é vital para práticas de manejo (BHATTACHARYYA et al., 2021; EL GAYAR, 2020), para a garantia da sustentabilidade da produção agrícola e para a mitigação de potenciais impactos negativos na segurança alimentar (BENAZZI; LEITE, 2021; ESUBALEW et al., 2023; KORITSCHONER et al., 2023).

Nesse sentido, essa pesquisa tem como hipótese que a implementação de consórcio entre sorgo e feijão-caupi pode resultar em uma melhoria significativa no balanço de nutrientes no solo. Pressupõe-se que a interação entre essas duas culturas promova uma melhor utilização dos nutrientes presentes no solo, resultando em efeitos positivos nos teores de nutrientes nas plantas e consequentemente, na manutenção da produtividade agrícola com a redução de necessidade de fertilização sintética.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar o efeito do consórcio sorgo-feijão sobre o balanço de nutrientes no sorgo em condições de cultivo no semiárido brasileiro

2.2.1 Objetivos Específicos

- Quantificar as entradas e saídas de nutrientes em monocultivos de sorgo e em cultivos consorciados de feijão-caupi e sorgo.
- Comparar o balanço de nutrientes em monocultivos de sorgo e nos cultivos consorciados com feijão-caupi e sorgo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEGURANÇA ALIMENTAR

3.1.1 Panorama climático e conceitos gerais

De acordo com IPCC, o termo “mudanças climáticas” refere-se a qualquer mudança no clima ao longo do tempo, seja devido à variabilidade natural ou como resultado das ações antrópicas. Esse entendimento conceitual sobre mudanças climáticas difere da definição empregada pela *United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC, que atribui o termo mudança climática apenas às variações no clima provocadas direta ou indiretamente pelas atividades humanas, enquanto as alterações no clima provocadas pelos processos naturais de variação são chamadas de Variabilidade Climática. Entretanto, a compreensão sobre as mudanças climáticas e todos os processos que decorrem a partir delas requer, previamente, um entendimento claro sobre a diferença entre tempo e clima. De acordo com Miller e Spoolman (2012), o tempo é o conjunto de fatores físicos da baixa atmosfera que acontecem em um determinado período de horas ou dias em um local específico, enquanto o clima se caracteriza por um padrão mais geral das condições atmosféricas de um local durante um longo período.

Os níveis de temperaturas que garantem, em grande parte, a existência e manutenção de vida no planeta só são possíveis graças ao fenômeno natural conhecido como efeito estufa. Sem ele, as temperaturas seriam aproximadamente 30°C menores que as registradas atualmente (MILLER; SPOOLMAN, 2012; KWEKU et al., 2018; ZHU, 2023). Os gases que provocam o efeito estufa são chamados de gases de efeito estufa (GEE) e os principais são: dióxido de carbono (CO₂), gás metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorcarbono (CFCs), gás ozônio (O₃) e o vapor d’água (MILLER; SPOOLMAN, 2012). Esses gases desempenham um papel importante, pois retêm parcialmente a radiação térmica que é emitida quando a radiação solar atinge a superfície terrestre, evitando que haja o resfriamento da terra ao ponto de inviabilizar a vida no planeta (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017; KWEKU et al., 2018).

O aquecimento global na visão de Ollila (2019) é o fenômeno provocado pelos GEE que, devido às suas características de absorção de energia térmica solar, elevam as temperaturas da troposfera terrestre de modo natural e dinâmico. Porém, os níveis de concentração dos GEE estão aumentando na atmosfera devido às atividades antrópicas, consequentemente aumentando a retenção da radiação solar e, dessa maneira, as temperaturas médias estão aumentando desde

meados do século XIX, fazendo com que o termo “aquecimento global” adquira contornos mais preocupantes do ponto de vista do equilíbrio ambiental (IPCC, 2022).

Ao se debruçar sobre esse tema, as discussões não estão voltadas apenas para entendimento das variações das temperaturas e seus fatores determinantes, mas também estão voltadas – e aqui está a principal preocupação – para os impactos que essa mudança acarretará ao meio ambiente como um todo (KOLAWOLE; OKONKWO, 2022). Em que pese haver registro de mudanças climáticas oriundas de causas naturais, grande parte dos pesquisadores são categóricos em afirmar que a principal causa das mudanças climáticas decorrem das ações antrópicas, ou seja, as atividades humanas sendo o fator fundamental na alteração do clima (SAMUELSON et al., 2021).

Neste sentido, o IPCC (2021) afirma em seu Sexto relatório do Grupo de Trabalho I, que a influência humana aqueceu o clima do planeta a uma taxa sem precedentes pelo menos nos últimos 2000 anos. Se o recorte temporal for apenas a última década (2011 – 2020) as temperaturas foram maiores do que os períodos mais quentes de vários séculos mais recentes. Além disso, o relatório mostra que o planeta irá atingir ou exceder possivelmente 1,5 °C de aquecimento nas próximas duas décadas (2021 – 2040), isto é, a extensão e magnitude dos impactos das mudanças climáticas serão maiores do que os estimados em avaliações anteriores.

Portanto, esses fenômenos climáticos têm grande poder de impactos sobre os ecossistemas naturais, geleiras, recursos hídricos, zonas costeiras, saúde humana e agricultura. Neste último caso, trazendo severos riscos à segurança alimentar e nutricional da população (MBOW et al., 2019).

Quando se trata especificamente da segurança alimentar e nutricional da população mundial, as preocupações ficam mais evidentes, uma vez que há uma relação diretamente proporcional entre as mudanças climáticas e a produção/disponibilidade de alimentos (BENAZZI; LEITE, 2021). A Declaração da Cúpula Mundial sobre Segurança Alimentar definiu o termo Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) como a condição em que todas as pessoas possam ter, em todos os momentos, acesso físico, social e econômico a alimentos suficientes, seguros e nutritivos para atender às suas necessidades dietéticas e preferências alimentares para uma vida ativa e saudável (FAO, 2017; SELIGMAN et al., 2023).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), a SAN possui quatro dimensões essenciais: disponibilidade, acesso, utilização e estabilidade. Korbli e Acheamponga (2020) afirmam que disponibilidade está relacionada tanto ao fornecimento de alimentos de forma suficiente quanto a sua produção. O acesso aos

alimentos se refere ao acesso físico e sociocultural, bem como à condição econômica de aquisição. A utilização de alimentos é entendida como todo o processo de obtenção de energia e dos nutrientes suficientes para garantir uma dieta saudável e está atrelada a condição nutricional de cada pessoa. Além disso, a utilização de alimentos envolve alguns fatores importantes como: acesso a água limpa, preparo dos alimentos, diversificação da alimentação, práticas alimentares e distribuição local de alimentos. Por fim, a estabilidade alimentar está associada à garantia de que os demais pilares serão alcançados ao longo do tempo e para isso as políticas ambientais e econômicas desempenham um papel fundamental.

A SAN faz parte de um conjunto de objetivos ambiciosos que a Organização das Nações Unidas (ONU) almeja atingir nas próximas décadas. Esses são conhecidos como Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e, especificamente, o 2º ODS tem como meta principal: “Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável” (ONU, 2015).

Essa relação entre as mudanças climáticas e a segurança alimentar e nutricional nem sempre foi entendida como causa e consequência (MACHEKA et al., 2022). Os primeiros estudos que relacionam os impactos das mudanças climáticas sobre a segurança alimentar começaram a surgir no início da década de 1990 (ALPINO et al., 2022). Esses estudos traziam algumas visões tranquilizadoras e outras não tão tranquilas em relação a esses riscos. A visão que predominou algum tempo e que inclusive influenciou a FAO, considerava que as mudanças climáticas, no geral, não afetariam de forma significativa as perspectivas alimentares globais (ASSUNÇÃO, 2022; RAY et al., 2019). Isto é, na visão destes estudos, os fenômenos climáticos criariam apenas condições ambientais favoráveis e não tão favoráveis, no entanto a produção de alimentos não seria impactada. Além disso, a característica de adaptação dos agricultores às mudanças do clima e os avanços tecnológicos contribuiriam de forma compensatória para a mitigação desses impactos (ASSUNÇÃO, 2022; RAY et al., 2019).

Embora a produção agrícola, no geral, tenha aumentado (KORITSCHONER et al., 2023), o crescimento global tem desacelerado nos últimos 50 anos e isso se deve às mudanças no clima (IPCC, 2022). Ou seja, ao olharmos especificamente para a segurança alimentar e seus pilares, observa-se que já há uma situação preocupante, uma vez que as mudanças climáticas já se constituem em um risco real para a disponibilidade de alimentos, o acesso, a utilização e a estabilidade do sistema alimentar (ALPINO et al., 2022; GABRIEL et al., 2014; IPCC, 2022; TAVORA; FRANÇA, 2021).

Neste sentido, Behnassi et al. (2021) é categórico ao afirmar que o aumento dos eventos climáticos extremos tem exposto milhões de pessoas ao redor do mundo à insegurança alimentar. Ademais, a FAO alerta para os impactos vinculados à produção de alimentos e indica estimativas de perdas superiores a 50% das plantas, 11% das aves e mais de 20% dos insetos polinizadores, levando ao comprometimento da capacidade dos sistemas produtivos, principalmente a produção de alimentos.

3.1.2 Cenários

O atual cenário do clima, de acordo com o IPCC (2022), é alarmante. As temperaturas da atmosfera, do oceano e da terra aumentaram a níveis que podem impactar de forma negativa toda a vida no planeta, e a influência humana está sendo o principal impulsionador desses eventos que estão ocorrendo em todas as partes do mundo. A temperatura registrada na superfície global, somente nas duas primeiras décadas do século XXI (2000-2020), foi superior em aproximadamente 1°C quando se compara com as cinco últimas décadas do século XIX (1850-1900) (IPCC, 2022).

O aumento da frequência dos fenômenos climáticos na Terra é a característica mais marcante da vida no antropoceno (CENCI; LORENZO, 2020; SHIRAIWA, 2023). Estudos apontam que apenas na última década (2010 – 2020) foram registradas os seis anos mais quente da história do planeta (McCALLUM, 2020). Além disso, em 2019 foi observado um aumento nas concentrações dos principais GEE, atingindo média anual de 410 partes por milhão (ppm) para CO₂, 1.866 partes por bilhão (ppb) para CH₄ e 332 ppb para N₂O. Essas concentrações evidenciam a vulnerabilidade e a exposição tanto dos ecossistemas naturais e seus fatores constituintes quanto das suas comunidades humanas. (IPCC, 2022).

O sexto relatório do grupo de trabalho I do IPCC aponta que já são perceptíveis inúmeros impactos adversos generalizados decorrentes das alterações climáticas, podemos citar dentre eles: aumento da mortalidade humana em decorrência das constantes ondas de calor, acidificação dos oceanos, aumento do nível do mar, diminuição das precipitações em diversas regiões ocasionando secas prolongadas, perda da biodiversidade marinha e terrestre, recuo das geleiras etc.

O homem ainda não pode prever o futuro, porém, por meio dos cenários, permite-se explorar possíveis futuros (AMORIM, 2020; NAZARENKO et al., 2022). Desse modo, todo modelo que tenha como finalidade estimar as condições futuras precisa se basear em cenários.

No caso das mudanças climáticas, os cenários se baseiam em possíveis trajetórias de emissões ou concentrações de gases de efeito estufa (LAWRENCE et al., 2021; AMORIM, 2020).

O quinto relatório do IPCC (2014) incorporou os cenários RCPs (Representative Concentration Pathways) aos seus modelos de projeções. Esses cenários, diferentemente dos que eram utilizados na década de 1990, consideram as diferentes trajetórias de concentrações de GEE na atmosfera, usando o forçamento radiativo como referência. Segundo, Lawrence et al. (2021) esses cenários são baseados em diferentes níveis de emissões de GEE que a sociedade poderá produzir futuramente, variando de altas emissões a reduções significativas. Eles usam vários modelos climáticos para prever como esses diferentes níveis de emissões afetarão o clima, isto é, são projetados para capturar a incerteza nas condições climáticas futuras, considerando uma ampla gama de possíveis cenários de emissão e seus impactos no clima, incluindo as mudanças nas temperaturas e níveis de precipitações.

Os cenários RCPs são classificados em RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e o RCP 8.5. Dentre esses cenários, o RCP 2.6 é considerado o mais otimista, ou seja, as concentrações de GEE são reduzidas ao longo do tempo. Esse cenário de acordo com Kothiyal et al. (2023), pressupõe que as emissões atinjam o pico por volta de 2020 e depois diminuam substancialmente, exigindo o uso de tecnologias e estratégias para remover CO₂ da atmosfera. Enquanto os cenários RCP 4.5 e o RCP 6.0 são cenários que projetam um aumento da concentração de GEE, porém, essa concentração sofrerá uma estabilização logo após a virada do século XXI (DENISOV et al., 2022). Por fim, o RCP 8.5 é o cenário mais pessimista, haja vista que nesse cenário os níveis de concentrações de GEE vão aumentando ao longo do tempo, alterando significativamente os padrões de precipitações e levando a uma maior frequência de eventos extremos (MAJHI et al., 2022).

3.1.3 Impactos na agricultura

A agricultura é a atividade humana mais vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas, devido à forte dependência do suprimento adequado de água e temperatura, além da necessidade de um delicado balanço atmosférico de gases (BHATTACHARYYA et al., 2020; NICHOLLS et al., 2015; SENTELHAS; MONTEIRO, 2009). Historicamente é uma atividade bastante antiga e, embora não haja um consenso sobre o período exato do seu surgimento, estudos arqueológicos indicam que a agricultura teria surgido de forma independente em várias regiões do mundo há cerca de 12 a 10 mil anos (HE, 2023; GONÇALVES, 2012; SANTILLI, 2009).

A relação do homem com a natureza mudou radicalmente com o advento da agricultura, pois aos poucos a sociedade substituiu a prática de coleta de grãos, principalmente cereais, gerados naturalmente, pela seleção e cultivo de algumas espécies que eram usadas como alimentos, medicamentos, em rituais religiosos etc. (GIESECKE, 2023; BHARGAVA et al., 2019; HE, 2023). Neste sentido, Bhargava et al. (2019) afirmam que a agricultura evolui ao longo do tempo e passa por transformações sucessivas que tanto afetam as sociedades em lugares e tempos diferentes quanto está diretamente associada às mudanças ambientais, sociais, econômicas e culturais.

Desde a primeira revolução agrícola que criou os sistemas de culturas de cereais e forrageira sem o pousio, até a conhecida “revolução verde” que se caracterizou pela associação de insumos químicos, mecânicos, biológicos e genéticos e que tinha, ao menos no papel, o objetivo de acabar com a fome no mundo, a agricultura enfrenta desafios enormes, principalmente no que se refere às condições climáticas, uma vez que a agricultura é extremamente influenciada por fatores físicos naturais como solo, relevo e clima (VAN DEN HEEVER; JONES, 2022). Neste sentido, o clima exerce um importante papel no desenvolvimento das culturas (ILIC et al., 2022).

Segundo o IPCC (2022), desde o período pré-industrial, a temperatura do ar na superfície terrestre aumentou quase o dobro da temperatura média global, e os eventos extremos decorrentes dessa alteração climática afetaram negativamente a agricultura. Esses impactos, de acordo com o relatório, já são visíveis nas taxas de crescimento animal e de produtividade nos sistemas pastoris, bem como nos rendimentos das colheitas de algumas culturas (por exemplo, milho, trigo e arroz) e na forma como diversas pragas e doenças respondem a essas mudanças. Como consequência desses impactos, milhões de pessoas já estão vivendo sob insegurança alimentar aguda principalmente em muitos locais na África, Ásia, América Central, América do Sul, ilhas pequenas e ártico.

Além dos problemas já mencionados, alguns impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura são irreversíveis (TORETI et al., 2022). Dados do IPCC (2022) apontam que a escassez de água atingirá cerca de 178 milhões de pessoas até 2050 a um nível de aquecimento de 1,5°C, caso esse nível se eleve para 2°C o número de pessoas atingidas será de 220 milhões. Ademais, tanto a estabilidade da oferta de alimentos deverá diminuir à medida que a magnitude e a frequência de eventos climáticos extremos aumentem (ADENÄUER et al., 2023; POLAZZO et al., 2023), quanto a qualidade nutricional das culturas podem diminuir com o aumento das concentrações de CO₂ atmosférico (IPCC, 2022; SATHEE et al., 2022).

Falcon et al. (2022), enfatizam que o aumento da população mundial combinado com as mudanças nos padrões de consumo resultará no aumento da demanda por alimentos, rações e água nas próximas décadas. Como consequência, a população mais vulnerável será impactada diretamente pelos efeitos negativos das mudanças climáticas sobre a agricultura (ALFIERI et al., 2023), uma vez que a elevação dos preços dos alimentos implicará no aumento da insegurança alimentar e a fome dessa parcela populacional. Neste ponto específico, o IPCC (2022) estima por meio de modelos econômicos e agrícolas globais, um aumento médio de 7,6% nos preços dos cereais em 2050, amplificando dentre outros problemas, a migração induzida por fatores ambientais tanto dentro quanto fora dos países atingidos.

Portanto, as pesquisas ao apontar o caráter indissociável entre os fenômenos climáticos e a segurança alimentar mundial (NICHOLLS et al., 2015; HOSSAIN et al., 2023), sintetizam, dentro de uma lógica de vulnerabilidade e interdependência, a relação entre as mudanças climáticas e a agricultura. Logo, as mudanças no clima podem comprometer ou até mesmo inviabilizar os sistemas produtivos e provocar uma série de efeitos colaterais, como: êxodo rural, diminuição na produção de alimentos, comprometimento alimentar na localidade, aumento de preço, entre outros (GUYOT et al., 2015; KEUTGEN, 2023).

3.1.4 Sistemas resilientes às mudanças climáticas.

Hart (1979) definiu um sistema como sendo um arranjo de componentes físicos, um conjunto de elementos unidos e relacionados de tal maneira que forma uma unidade e atua como um todo. Para ele, todo sistema é constituído por seus elementos básicos, como: os componentes, a interação entre esses componentes, as entradas, as saídas e os limites.

Por outro lado, o conceito de resiliência possui inúmeros significados dentro da literatura e está intimamente relacionado ao conceito de adaptação, estabilidade e sustentabilidade (CANUTO, 2017; GRYGORENKO; NAYDONOVA, 2023). Foi utilizado primeiramente na engenharia como um conceito ligado a física e que seria a “capacidade de um material sofrer uma tensão e logo depois recuperar o seu estado normal quando, suspenso o estado de risco” (GUYOT, 2018; SENTELHAS; MONTEIRO, 2009). Neste sentido, a resiliência é entendida, na visão de Holling (1973), como capacidade de um sistema se restabelecer às condições anteriores após ser impactado por danos causados por um distúrbio considerável.

Quando se referem aos sistemas resilientes agrícolas, autores a definem como a capacidade e habilidade dos sistemas agrícolas de não somente enfrentar, mas também superar

os mais complexos cenários adversos, como por exemplo, clima desfavorável, epidemias (pragas e doenças), oscilações de mercado e custo de produção (BOAHEN et al., 2023; DARNHOFER, 2021). Portanto, um sistema resiliente responde a eventos perigosos ou lida com perturbações extremas de forma adaptativa, na medida em que mantém sua função essencial, identidade e estrutura (BOAHEN et al., 2023; SUNDSTROM et al., 2022).

Dados do relatório do Grupo de Trabalho II para o IPCC 2022 sobre impactos, adaptação e vulnerabilidade, mostram que muitos sistemas naturais estão próximos dos limites rígidos de sua capacidade de adaptação natural e que outros já atingiram esse limite como é caso de algumas florestas tropicais, recifes de corais, zonas costeiras úmidas, regiões polares e montanhosas. corroborando com essa questão, Klausmeier et al. (2020) afirmam que muitos sistemas naturais estão de fato próximos dos limites estritos de sua capacidade de adaptação natural, especialmente quando se considera interações ecológicas complexas e limites fundamentais para adaptação. Estima-se que em níveis de aquecimento global maiores que 1,5°C algumas medidas de adaptação baseadas em ecossistemas, não serão mais eficazes no fornecimento de benefícios para as pessoas (ELLISON, 2020; KUMAR, 2022)

Entender a resiliência adaptativa dos sistemas e sua relação com as oscilações climáticas, antes de tudo, requer que se identifique os níveis de vulnerabilidade, de risco e de ameaças em que esses sistemas estão inseridos e isso não é tarefa tão simples. Para Lalyer et. al (2020), um sistema agrícola vulnerável é aquele que se apresenta incapaz de absorver os efeitos de uma determinada alteração ambiental. Ou seja, quando confrontado com alguma perturbação externa, não consegue se adaptar ao novo cenário e tende a diminuir a sua capacidade produtiva devido a perda da biodiversidade, do solo e da água.

Portanto, nas palavras de Sundstrom et al. (2022), a resiliência depende da adoção de estratégias que diminuam sobre as culturas, os efeitos adversos dos eventos climáticos. Para isso, faz-se urgente a adoção e utilização de sistemas que apresentem resiliência socioecológica a condições climáticas extremas (GUYOT et al., 2015; SUNDSTROM et al., 2022).

Tendo em vista que as variações ambientais, em especial a modificação nos padrões de temperatura e precipitação, além de outras mudanças globais, poderão afetar diferentes aspectos da produção agrícola (CORREIA et al., 2022), Nicholls et. al. (2015) destacam que algumas ações empregadas são cruciais para potencializar os sistemas agrícolas e, por conseguinte, aumentar a sua resiliência em face de eventos extremos, são elas: a) a diversificação de culturas e datas de semeadura; b) escolha de cultivares ou variedades; c) definição da densidade populacional da cultura; d) utilização do cultivo mínimo ou do plantio direto; e) preparo do solo

em profundidade; f) correção das deficiências nutricionais e controle integrado de pragas e doenças; g) uso de quebra-ventos; h) uso da irrigação; i) alocação de culturas e cultivares adequados a diferentes posições do relevo; e j) utilização de reguladores de crescimento vegetal.

Outra característica que confere maior capacidade funcional e resiliência aos agrossistemas é a sua biodiversidade (SUNDSTROM et al., 2022). A biodiversidade aumenta a resiliência dos ecossistemas na medida em que permite a coexistência de várias espécies, desempenhando papéis diferentes, porém respondendo de forma diferente à modificação da paisagem humana (WALKER, 2020). Neste sentido, a existência de diversos componentes que respondem de forma diferentes aos estresses ambientais, é a chave para que haja um bom funcionamento do sistema como um todo e, conseqüentemente, um fornecimento contínuo dos seus serviços, mesmo sob mudanças ambientais (KEUTGEN, 2023; VANDERMEER et al., 1998).

Com isso, espera-se que os estresses abiótico e biótico aumentem e forcem os sistemas agrícolas a funcionarem sob níveis de perturbação ainda maiores em um futuro próximo. Entretanto, para que os sistemas continuem, mesmo sob esses eventos extremos, fornecendo seu serviço vital, é necessário que eles sejam resilientes (BOAHEN et al., 2023; THOMPSON et al., 2023).

Segundo Lin (2011), a biodiversidade é essencial na manutenção do bom funcionamento dos ecossistemas e essa diversificação pode ocorrer de muitas formas e em diferentes escalas, dando assim, uma ampla variedade de opções aos que queiram fazer uso dessas estratégias.

A organização dos sistemas agrícolas resilientes, na visão de Boahen et al. (2023) são configurados em diferentes tipos, de acordo com características específicas. Eles classificaram-nos em sistemas adaptados ao clima, sistemas resilientes a desastres, sistemas específicos da região, sistemas focados na sustentabilidade e sistemas baseados em pesquisas quantitativas. No que se refere aos sistemas específicos da região e aos sistemas adaptados ao clima, eles os definiram como aqueles que variam de acordo com a região geográfica e como aqueles que apresenta a capacidade de resistir e se adaptar às mudanças climáticas, como aumento das temperaturas e alterações nos padrões de chuvas.

Um sistema que se relaciona diretamente com os dois tipos definidos anteriormente é o sistema agrícola conhecido como policultivo ou sistema consorciado. Esses sistemas, nas visões Dugassa (2022) e Reddy et al. (2023), definem-se pelo cultivo de duas ou mais espécies simultâneas no mesmo local com a intensificação de cultivo tanto na dimensão temporal quanto espacial, que tem por finalidade a otimização do espaço produtivo e a minimização dos

impactos para as culturas. Esse tipo de sistema tem sido amplamente utilizado devido aos inúmeros benefícios que proporciona, pois contribuem na potencialização dos nutrientes no solo, diminuem a erosão/lixiviação, além de aumentar a estabilidade do solo e a produtividade (REZENDE et al., 2019).

3.2 SISTEMAS DE CONSÓRCIOS ENTRE GRAMÍNEAS E LEGUMINOSAS E O BALANÇO DE NUTRIENTES

Os sistemas consorciados integram um dos grandes grupos no qual uma cultura pode ser enquadrada, a do cultivo múltiplo. O cultivo múltiplo diz respeito ao plantio de mais de uma cultura em uma mesma área agrícola e no mesmo período (RYAN, 2021). Ele pode ser dividido em cultivos simultâneos, cultivo mistos, cultivo consorciados ou cultivo em faixa (MOORE et al., 2023).

Trata-se de uma prática bastante antiga que remonta às primeiras civilizações e que tem sido utilizada globalmente para aumentar a produção agrícola e atender as demandas alimentares. Esse método foi desenvolvido como uma forma de maximizar o uso da terra e dos seus recursos, e historicamente, o cultivo consorciado era praticado para aproveitar os diferentes padrões de crescimento e necessidades de recursos de várias plantas (NASAR et al., 2019).

De acordo com Reddy et. al (2023), são visíveis as vantagens que os sistemas consorciados apresentam, principalmente no que diz respeito ao aumento e estabilidade da produção, controle da erosão e aproveitamento mais eficiente dos suprimentos de águas e nutrientes em diferentes camadas do solo. Além disso, os usos de cultivos consorciados favorecem a formação de microclimas dentro das áreas cultivadas, e isso pode reduzir a ocorrência de doenças e pragas nos sistemas (SAMMAMA et al., 2023).

Um dos tipos de sistemas agrários consorciados mais utilizados na agricultura é o que envolve o cultivo simultâneo entre gramíneas e as leguminosas, dadas as características complementares dessas famílias vegetais (BEZERRA, 2022; GALEANO, 2021). As leguminosas, devido a sua ampla distribuição geográfica, são caracterizadas como uma das maiores famílias botânicas. Essas plantas, diferentemente das gramíneas, apresentam um mecanismo metabólico conhecido como C₃. Nesse processo, há a perda de carbono pela fotorrespiração durante a redução do CO₂ para os níveis de açúcares simples (TAIZ; ZEIGER, 2017). Ademais, as leguminosas têm um papel fundamental para a agricultura global e para a segurança alimentar, uma vez que esses vegetais, entre outras coisas, fornece aproximadamente 33% das necessidades totais de nitrogênio protéico da dieta para humanos (SAIKIA et al.,

2020). Isso decorre do fato de que essas plantas possuem a capacidade única de realizar a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), que consiste em fixar nas suas raízes o nitrogênio atmosférico por meio da associação simbiótica com bactérias que o convertem em composto absorvível pelas plantas (BATISTA et al., 2018). Sobre essa questão, Döbereiner (1990) concluiu que as leguminosas são de fundamental importância para a agricultura tropical. Segundo essa autora, essa família botânica apresenta o mecanismo mais sofisticado e eficiente entre as associações de plantas superiores com bactérias fixadoras de N_2 .

Por sua vez, as gramíneas como o sorgo e milho, apresentam um sistema radicular mais denso e profundo e isso auxilia na exploração de nutrientes em camadas mais profundas do solo (BATISTA; VILELA, 2023; LINDER et al., 2018). De acordo com Souza et al. (2020), as gramíneas são uma das famílias botânicas mais importantes para a agricultura e para a economia humana, uma vez que fornece uma imensa quantidade de vegetais que são utilizados para diversos fins. O milho (*Zea mays*), o trigo (*Triticum aestivum*), o arroz (*Oryza sativa*), a cana de açúcar (*Saccharum officinarum*) e a braquiária (*Brachiaria brizantha*) são algumas gramíneas essenciais para a humanidade. As gramíneas são plantas que apresentam metabolismo do tipo C_4 . Esse mecanismo de fixação de carbono durante a fotossíntese praticamente elimina a fotorrespiração, evitando a perda de carbono e consequentemente apresentando uma elevada taxa de crescimento em alta irradiância (EDIVAN, 2018; SILVA, 2018; TAIZ; ZEIGER, 2017).

Segundo Singh et al. (2023), a integração de diversas culturas, como gramíneas e leguminosas, em sistemas de consórcio tem um enorme potencial para a manutenção da saúde dos fatores críticos para a sustentabilidade a longo prazo dos sistemas agrícolas nas regiões semiáridas. Neste contexto, esse modelo de cultivo melhora os atributos químicos e físicos do solo, aumentando a produtividade de forragem e atenuando os problemas de degradação das pastagens a longo prazo, se comparado com sistemas exclusivamente de gramíneas ou de leguminosas (REDDY et al., 2023).

Esses benefícios advêm das características intrínsecas a cada família vegetal e como cada uma delas atua ou contribui para a manutenção e melhoramento do próprio sistema. Portanto, faz-se necessário conhecer as suas diferenças morfofisiológicas e todas as implicações delas decorrentes (SEMAHEGN, 2022; SIMIONI et al., 2014).

De um modo geral, ao se utilizar a consorciação entre gramíneas e leguminosas, busca-se uma forma mais eficiente de ampliação das potencialidades de cada cultura dentro de um sistema, valendo-se dos seus aspectos individuais e complementares (BATISTA; VILELA,

2023; SANTOS, 2014). A título de exemplo, tem-se a fixação biológica de nitrogênio. Embora já se tenha identificadas bactérias diazotróficas colonizando tanto a superfície quanto o interior das raízes de algumas espécies de gramíneas (principalmente cana-de-açúcar, sorgo, arroz e diversos tipos de capins), as quantidades de Nitrogênio fixado são muito baixas, havendo assim a necessidade do uso de fertilizantes nitrogenados. (ANTUNES et al., 2019; NONG et al., 2022; TOVI et al., 2021). Neste sentido, as leguminosas complementam as gramíneas naquilo que estas não conseguem desenvolver, principalmente o aporte natural de nitrogênio ao sistema solo-planta, uma vez que as leguminosas podem fixar aproximadamente 40 a 60 milhões de toneladas métricas por ano em ambientes agrícolas (SAIKIA et al., 2020).

A respeito disso, Renjith et al. (2023) afirma que a consorciação entre leguminosas e gramíneas afeta não somente os níveis de nutrientes no solo, mas também contribui para o melhoramento da estrutura do solo, a redução da erosão e o aumento da atividade microbiana. Outra vantagem muito evidente na consorciação entre gramíneas e leguminosas é o melhoramento da fertilidade do solo a longo prazo, principalmente nos estoques de carbono, nos teores da matéria orgânica e, conseqüentemente, no fluxo dos nutrientes (KCHAOU et al., 2022; WEI et al., 2022).

Sobre a fertilidade do solo, Batista et. al (2018) a definem como sendo a capacidade apresentada pelo solo de fornecer nutrientes essenciais para o crescimento das plantas. Esses nutrientes, do ponto de vista de nutrição vegetal, incluem os macronutrientes como Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) e os micronutrientes, como Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Cloro (Cl), Molibdênio (Mo). As plantas precisam tanto dos macronutrientes quanto dos micronutrientes para o seu desenvolvimento e esses termos estão relacionados às diferentes quantidades que esses elementos são demandados pelas plantas, ou seja, os macronutrientes são requeridos em maior quantidade e os seus teores no tecido vegetal são expressos em g/kg, enquanto os micronutrientes são demandados em uma quantidade bem menor que os macronutrientes e têm os seus teores expressos no tecido vegetal em mg/kg (LOPES, 1988; RAIJ, 1981; RAIJ, 2011; RONQUIM, 2020). Cada nutriente tem uma função específica na planta, como a produção de clorofila, a formação de raízes e a regulação do crescimento. Portanto, é importante garantir que as plantas recebam todos esses nutrientes em quantidades adequadas para crescerem saudáveis e produzirem bem (BATISTA et al., 2018; RAIJ, 2011; RONQUIM, 2020).

A fertilidade do solo não é apenas formada pela presença ou não de nutrientes essenciais para as plantas, ela é formada por vários fatores, incluindo a capacidade de retenção de água e

nutrientes, a estrutura do solo e a atividade biológica existente (BATISTA et al., 2018; RONQUIM, 2020). Ou seja, a garantia que as plantas tenham acesso aos nutrientes necessários, durante todo ciclo de crescimento, está intimamente relacionado a estrutura desse solo, principalmente a sua textura e a sua porosidade, bem como a atividade biológica de microrganismos benéficos e minhocas, que atuam no processo de decomposição da matéria orgânica e na liberação desses nutrientes para as plantas (AKHILA; ENTOORI, 2022; COSTA; COSTA, 2015; LEUTHER, 2023).

Ademais, a fertilidade do solo pode ser afetada por fatores externos, como o clima e as práticas agrícolas (MARTINS et al., 2022; RIBEIRO, 2020), pela erosão do solo que pode remover nutrientes essenciais e reduzir a sua fertilidade (MARTINS et al., 2022), bem como pelo uso excessivo de fertilizantes químicos que pode levar à acumulação de sais no solo e à redução da atividade biológica, afetando a fertilidade (BATISTA et al., 2018). Por outro lado, práticas sustentáveis como a rotação de culturas, os sistemas agrários consorciados e o uso de adubos orgânicos, podem ajudar e manter a fertilidade do solo ao longo do tempo (SEIXAS, et al., 2020). Portanto, a fertilidade do solo é formada por uma combinação de fatores externos e internos que afetam a sua capacidade de fornecer os nutrientes essenciais para o desenvolvimento dos vegetais (RAIJ, 1981; RAIJ, 1991; RAIJ, 2011).

A adubação é uma prática comum para melhorar a fertilidade do solo e aumentar a sua produtividade (BATISTA, 2018; ROPI et al., 2020). No que se refere especificamente aos solos tropicais, a adubação é essencial, uma vez que essas regiões costumam apresentar uma fertilidade bastante reduzida e uma acidez considerável (MEDEIROS et al., 2021; SILVA, et al., 2018; SOUSA et al., 2008). Há diferentes tipos de adubos disponíveis no mercado, como os adubos orgânicos e os adubos químicos e se faz necessário conhecer a real necessidade das plantas e a condição do solo para fazer a escolha certa (BATISTA, 2018).

Por isso a análise química do solo é uma ferramenta importante e indispensável nessa escolha, uma vez que, através dessa análise é possível determinar a quantidade de nutrientes presente no solo e verificar se há deficiência ou excesso de algum nutriente (SEIXAS et al., 2020; BRASIL et al., 2020). Além disso, é possível observar os sintomas visuais nas plantas, como por exemplo, amarelamento das folhas e o crescimento lento, isso pode indicar deficiência tanto de macronutrientes quanto de micronutrientes (BANG et al., 2021; DAS et al. 2017; MALAVOLTA, 1997; RAMASAMY et al., 2022).

Por outro lado, o excesso de nutrientes no solo proveniente da prática de adubação pode ser tão prejudicial quanto a sua deficiência, uma vez que pode ocasionar diversos problemas

que vão desde a toxicidade e o acúmulo de sais no solo (KULKARNI; GOSWAMI, 2019; RAIJ, 2011) até o aumento das emissões de gases de efeito estufa (PORTELA et al., 2018; SIGNOR; CERRI, 2013; SIGNOR et al., 2022). Por isso, é importante garantir, no processo de adubação, que seja disponibilizado adequadamente os nutrientes necessários, bem como um manejo correto do solo (ROSOLEM; STEINER, 2017).

Outro conceito importante na fertilidade do solo é o balanço de nutrientes no solo (OLIVEIRA, 2017; RESENDE, 2022). Esse conceito se refere à quantidade de nutrientes que entram e saem do solo ao longo do tempo (DICK, 2016; ESUBALEW et al., 2023). Durante o desenvolvimento das plantas, elas retiram os nutrientes do solo e com isso desfalam os estoques naturais disponíveis e, se esses não forem repostos, a fertilidade desse solo tende a diminuir ao longo do tempo (RAWAL et al., 2022; RESENDE et al., 2019). Por outro lado, se houver um excesso desses nutrientes no solo, ou seja, quantidade maior do que a demandada pelas plantas, eles podem sofrer a lixiviação para fora do sistema e contaminar as águas subterrâneas ou superficiais (KULKARNI; GOSWAMI, 2019).

O balanço de nutrientes é utilizado para identificar o estado atual das áreas cultivadas, ou seja, serve como um indicador da saúde do solo, evidenciando as práticas de manejo em relação à fertilidade e como consequência fundamentando medidas apropriadas (ESUBALEW et al., 2023)

O balanço de nutrientes, de acordo com Resende et. al. (2019), sofre a influência de vários fatores, como o clima, a topografia, o tipo de solo e as práticas agrícolas utilizadas. Por isso, para manter um balanço adequado de nutrientes no solo, é imprescindível monitorar de forma regular os níveis de nutrientes e adequar as práticas agrícolas conforme o necessário (SOUZA et al., 2023) e isso inclui a adubação orgânica ou inorgânica.

Para tanto, ressalta-se a necessidade de um entendimento claro das diferenças entre extração e exportação de nutrientes. Conceitua-se extração como a quantidade total de nutrientes acumulados na planta como um todo, por outro lado, somente os nutrientes que estão contidos na parte que foi colhida é que são considerados exportados (SOUZA et al., 2023; VIDAL, 2020). Logo, esse entendimento vai contribuir diretamente no manejo adequado de corretivos e fertilizantes, além de auxiliar na adoção de práticas mais sustentáveis (ESUBALEW et al., 2023), uma vez que as reposições dos nutrientes no solo serão influenciadas pelo sistema de produção praticado. Assim, a manutenção da fertilidade do solo e, conseqüentemente, a garantia de uma produção agrícola sustentável ao longo do tempo, é

influenciada, também, por um adequado balanço de nutrientes no solo (ABBOUD, 2013; RAIJ, 2011).

3.3 DINÂMICA DOS NUTRIENTES NO SISTEMA SOLO-PLANTA

A existência da agricultura só é possível graças a uma série de processos que se inter-relacionam com variados aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, da água, da planta e da atmosfera, isto é, o conhecido sistema solo-planta-atmosfera ou simplesmente SSPA (TARARIKO; LUKASHUK, 2021). Neste sentido, o cultivo de plantas objetivando o atendimento das necessidades humanas, é essencialmente dependente desses processos e de suas dinâmicas.

De acordo com Reichardt (2022), os elementos que compõem o SSPA estão interligados por uma rede de relações funcionais que resulta em um sistema balanceado no qual nada se perde, tudo se aproveita, em equilíbrio dinâmico. O equilíbrio dinâmico pressupõe que haja, entre outras coisas, movimentos, transformações, conversões e que tudo isso sejam regidos por uma série de leis e princípios fundamentais. Ademais, para manter esse equilíbrio, segundo o autor, o SSPA requer quatro elementos básicos: substâncias inorgânicas, elementos produtores, elementos consumidores e elementos decompositores.

Neste cenário, algumas substâncias orgânicas e inorgânicas que estão presentes nos ecossistemas, movimentam-se entre os diferentes compartimentos naturais, como solo-planta-animais-atmosfera, sofrendo modificações e se tornando, em certa medida, disponível ou não para serem utilizados pelos componentes do próprio sistema (MARTINEZ et al., 2021). Sendo assim, as interações entre a superfície terrestre e a atmosfera se dão por meio das ciclagens de praticamente todos os elementos biogeoquimicamente ativos, incluindo a água, o carbono, o nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis. Esses ciclos desempenham papéis fundamentais no funcionamento do sistema terrestre como um todo (BORMA et al., 2015).

O solo, um dos componentes do SSPA, de acordo com Raij (2011) se constitui na interface entre a litosfera, atmosfera e biosfera apresentando uma série de atributos e propriedades que permitem sustentar desde microrganismos até organismos superiores como é o caso dos vegetais. Portanto, ele se constitui em um repositório de elementos químicos, isto é, contém uma variedade de minerais e compostos orgânicos que são cruciais para a vida na Terra (SAGWAL et al., 2023; VASCONCELLOS et al., 2021).

Para entender esse grande repositório de elemento químico em que o solo se constitui, é necessário a compreensão de sua composição. De acordo com Martinez et al., (2021), a

composição dos solos é basicamente dividida em: atmosfera do solo, composta de N₂, O₂, CO₂, água e gases nobres (fase gasosa), a solução do solo formada pela água e os compostos dissolvidos (fase líquida) e por fim os compostos inorgânicos e compostos orgânicos (fase sólida). Sendo assim, a entrada desses elementos na biosfera se dá predominantemente por meio da relação do solo com as plantas, através de suas raízes que agem como “mineradoras da crosta terrestre”, absorvendo alguns elementos e translocando-os para diferentes partes das plantas onde são imprescindíveis para diversas funções biológicas (RAIJ, 2011; TAIZ; ZEIGER, 2017).

Os 92 elementos químicos que ocorrem naturalmente podem ser tóxicos (ANGULO-BEJARANO et al., 2021; STAFILOV et al., 2024), benéficos e até mesmo essenciais para as plantas (PRADO, 2021), dependendo de alguns fatores como: concentrações no solo, tipo de planta e condições ambientais. As plantas absorvem do solo ou das soluções nutritivas os elementos químicos sem grandes restrições, ou seja, pode absorver um elemento essencial, benéfico ou até mesmo tóxico. Razão pela qual, se observa, em análise química de tecido vegetal, uma grande diversidade de elementos químicos diferentes (BRADY; WEIL, 2009; MARTINEZ et al., 2021; PRADO, 2021).

Diversos elementos químicos são indispensáveis ao desenvolvimento vegetal, isto é, são essenciais para as plantas. Esses elementos químicos são assim classificados porque atendem a alguns critérios diretos e indiretos de essencialidades e atualmente tem-se um total de 17 elementos químicos classificados como essenciais, são eles: Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni) e Zinco (Zn) (BRADY; WEIL, 2009; PRADO, 2021; TAIZ; ZEIGER, 2017). Do ponto de vista fisiológico todos os elementos essenciais são nutrientes para as plantas, entretanto do ponto de vista da fertilidade do solo, o Carbono, o Hidrogênio e o Oxigênio não são nutrientes, apesar de serem considerados essenciais (RAIJ, 2011).

Umas das classificações dos nutrientes que são considerados essenciais às plantas, baseia-se na quantidade em que esses são exigidas pelas culturas, isto é, uma classificação quantitativa. Sendo assim, há os macronutrientes e os micronutrientes, e a dinâmica desses nutrientes no sistema solo-planta é um processo complexo e interativo que envolve a absorção, transporte, assimilação e reciclagem (PRADO, 2021). Os nutrientes presentes no solo têm sua origem principalmente na rocha-mãe que é a rocha subjacente a partir da qual a o solo se

desenvolve e na decomposição da matéria orgânica (MARSCHNER; RENGEL, 2023; NOVAK et al., 2021; RAIJ, 2011).

A absorção dos nutrientes pode ser realizada através das folhas, no processo chamado de absorção foliar, em que absorvem principalmente gás carbônico e oxigênio atmosférico (FERNÁNDEZ et al., 2020; NAZ, 2023), como também pode ser através das raízes (NAZ, 2023). A absorção pelas raízes das plantas se dá a partir da solução do solo, ou seja, para um determinado nutriente ser absorvido é necessário que ele se encontre na solução do solo próximo as raízes das plantas (MARTINEZ et al., 2021; RAIJ, 2011). O transporte dos nutrientes da solução do solo até as raízes pode ser por meio de três processos: interceptação radicular, fluxo de massa ou difusão. À medida que as plantas absorvem os nutrientes da solução do solo, a concentração pode diminuir com o tempo de maneira diferente para cada nutriente, por isso é imprescindível, que haja uma interação constante entre a solução do solo e a sua fração sólida (PÉREZ et al., 2022).

Por sua vez, os nutrientes ao serem absorvidos pelas plantas são acumulados na parte aérea e nas suas raízes, participando dos mais variados processos bioquímicos e fisiológicos das plantas (NAZ, 2023; PRADO, 2021). Quando essa planta morre, a sua fitomassa se transforma em resíduos orgânicos vegetais que serão mineralizados pelos microrganismos do solo, liberando os seus nutrientes novamente na solução do solo (FULFORD et al., 2023). Vale ressaltar que a mineralização, em linhas gerais, se constitui na passagem dos nutrientes da forma orgânica para a forma inorgânica no solo e pode acontecer também com os fertilizantes orgânicos adicionados ao solo, bem como com a decomposição da matéria orgânica humificada nativa do solo.

Entretanto, nem todo nutriente acumulado nas fontes orgânicas precisará ser mineralizado pelos microrganismos para serem liberados na solução do solo, isto é, alguns nutrientes oriundos da matéria orgânica, por exemplo, o potássio, que é absorvido na sua forma iônica K^+ , podem ser absorvidos diretamente pelas plantas sem a necessidade de passar pelo processo de mineralização microbiana (JATANA et al., 2020). No entanto, outros elementos essenciais, especialmente nitrogênio, fósforo e enxofre requerem a ação microbiana para convertê-los em formas que as plantas consigam absorver com maior facilidade (COONAN et al., 2020).

Uma vez na solução do solo, esses nutrientes podem ser absorvidos pelas plantas, mas podem também ser sorvidos pela fase sólida do solo por meio de mecanismos de adsorção específica, adsorção não-específica e precipitação (STRAWN, 2021). O nutriente que está na

fase sólida do solo e que se encontra em equilíbrio com a solução, o qual é denominado de nutriente lábil, pode desenvolver ligações químicas com maior energia, principalmente com os óxidos de ferro (Fe_2O_3) e de alumínio (Al_2O_3), transformando em formas conhecidas como nutrientes não lábil e, dessa forma, sendo mais difícil a sua liberação para a solução do solo (RAIJ, 2011).

Em relação aos teores disponíveis desses nutrientes no solo, eles variam em função de diversos fatores. Entre eles, podemos citar, o material de origem do solo (DHALIWAL et al., 2021), grau de desenvolvimento pedogenético do solo (SATHYANARAYAN et al., 2022), a atividade dos microrganismos do solo (NDABANKULU et al., 2022), o teor de matéria orgânica no solo (BASHIR et al., 2021), teor de argila no solo (OGUNNIYI, 2017), potencial de oxirredução do solo - Eh (BRUNEAU et al., 2022) e o pH do solo (BARROW; HARTEMINK, 2023).

Esses nutrientes podem estar disponíveis no solo em formas químicas que as plantas não conseguem absorver (formas menos solúveis) ou em formas que são mais fáceis de serem absorvidos por elas (formas mais solúveis). As formas menos solúveis de nutrientes no solo podem se apresentar como compostos orgânicos ou minerais pouco solúveis, além disso, essas formas requerem processos adicionais, como decomposição microbiana ou reações químicas que os transformem em formas solúveis (MARSCHNER; RENGEL, 2023).

No geral, os nutrientes se apresentam no solo na forma iônica, exceto o boro que em determinadas condições de pH fica na forma de uma molécula neutra, o ácido bórico (H_3BO_3). O nitrogênio se encontra no solo principalmente na forma de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+), o fósforo como fosfatos (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}), o potássio na forma (K^+), o cálcio na forma (Ca^{2+}), o magnésio na forma (Mg^{2+}), o enxofre na forma (SO_4^{2-}), o ferro nas formas (Fe^{3+} e Fe^{2+}), o manganês nas formas (Mn^{4+} e Mn^{2+}), o cobre na forma (Cu^{2+}), o zinco na forma (Zn^{2+}), o níquel na forma (Ni^{2+}), o cloro na forma (Cl^-) e o molibdênio na forma (MoO_4^{2-}) (OSMAN, 2013; PRADO, 2021).

Uma vez no sistema solo-planta, esses nutrientes apresentam mobilidades variadas tanto no solo quanto nas plantas. A mobilidade de um nutriente refere-se à facilidade com que esse pode se mover pelo solo para alcançar as raízes das plantas e como ele é transportado dentro da planta para os locais onde são necessários. Além disso, essa mobilidade influencia tanto a rapidez com que as plantas absorvem esses nutrientes quanto a sua eficiência de uso (NAEEM et al., 2017).

Por fim, entender a dinâmica de nutrientes no sistema solo-planta é fundamental do ponto de vista do manejo sustentável do solo, da segurança alimentar e nutricional, mas principalmente em cenários de mudanças climáticas, uma vez que, as mudanças climáticas podem afetar a disponibilidade e a dinâmica dos nutrientes nesse sistema (WANG et al., 2023). Por isso, a compreensão dessas interações poderá contribuir no desenvolvimento de estratégias que visem, entre outras coisas, a mitigação dos impactos que essas alterações climáticas podem causar na agricultura.

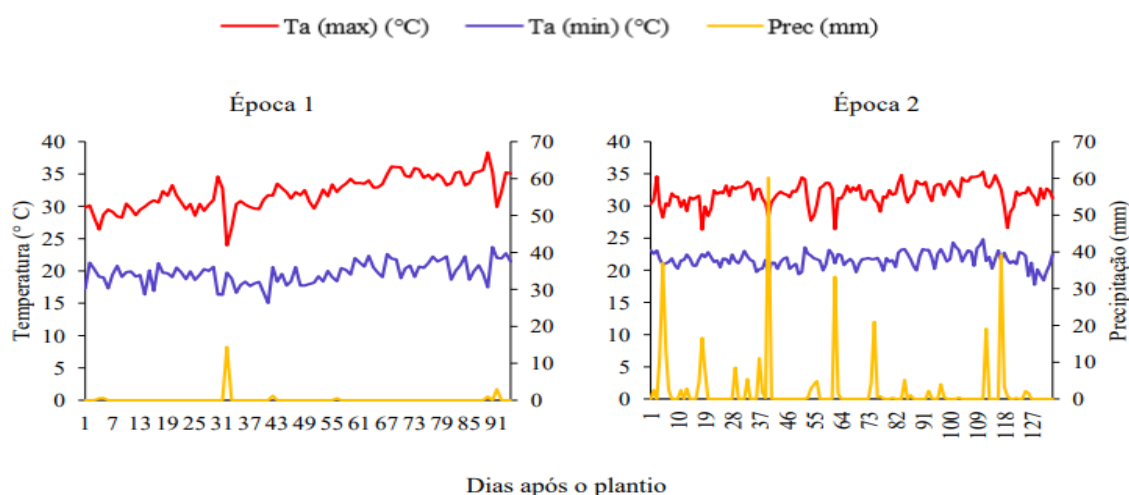
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO NO CAMPO

O experimento foi realizado no Campo Experimental da Caatinga, pertencente à Embrapa Semiárido, localizada no município de Petrolina - PE, na região do Submédio São Francisco (latitude 9° 8' 8,9" S, longitude 40° 18' 33,6" O, altitude 373 m), cuja região apresenta clima tropical semiárido, com precipitação média anual de 400 mm, umidade relativa média do ar de 67,8% e temperatura média do ar de 26,5°C (REDDY; AMORIM NETO, 1983). O clima da região é classificado como semiárido, tipo BSw_h, de acordo com a classificação de Köppen. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (SANTOS et al., 2018), apresentando uma textura média e relevo plano.

Os dados de temperaturas médias e precipitação pluviométrica foram coletados automaticamente por meio da estação meteorológica, localizada no campo experimental (Figura 1).

Figura 01 – Temperatura máxima (T_{max}), Temperatura mínima (T_{min}), Precipitação (Prec (mm)) e ciclo do sorgo biomassa e feijão-caupi (plantio à colheita) de duas épocas de plantio (Época 1: junho) e (Época 2: dezembro) de 2021.



Fonte: Nascimento (2023)

Foram utilizadas no experimento duas cultivares de sorgo biomassa (*Sorghum bicolor* L. Moench) (BRS716 e AGRI002e) cultivadas em monocultivos e em consórcio com quatro cultivares de feijão-caupi, distribuídos em 10 tratamentos com três repetições cada (Tabela 1).

Tabela 01 – Tratamentos utilizados no experimento.

TRATAMENTO	TIPO DE CULTIVO
BRS716	Monocultivo
AGRI002e	Monocultivo
BRS716 x BRS Itaim	Consórcio
AGRI002 x BRS Itaim	Consórcio
BRS716 x BRS Gurguéia	Consórcio
AGRI002e x BRS Gurguéia	Consórcio
BRS716 x BRS Guariba	Consórcio
AGRI002e x BRS Guariba	Consórcio
BRS716 x BRS Carijó	Consórcio
AGRI002e x BRS Carijó	Consórcio

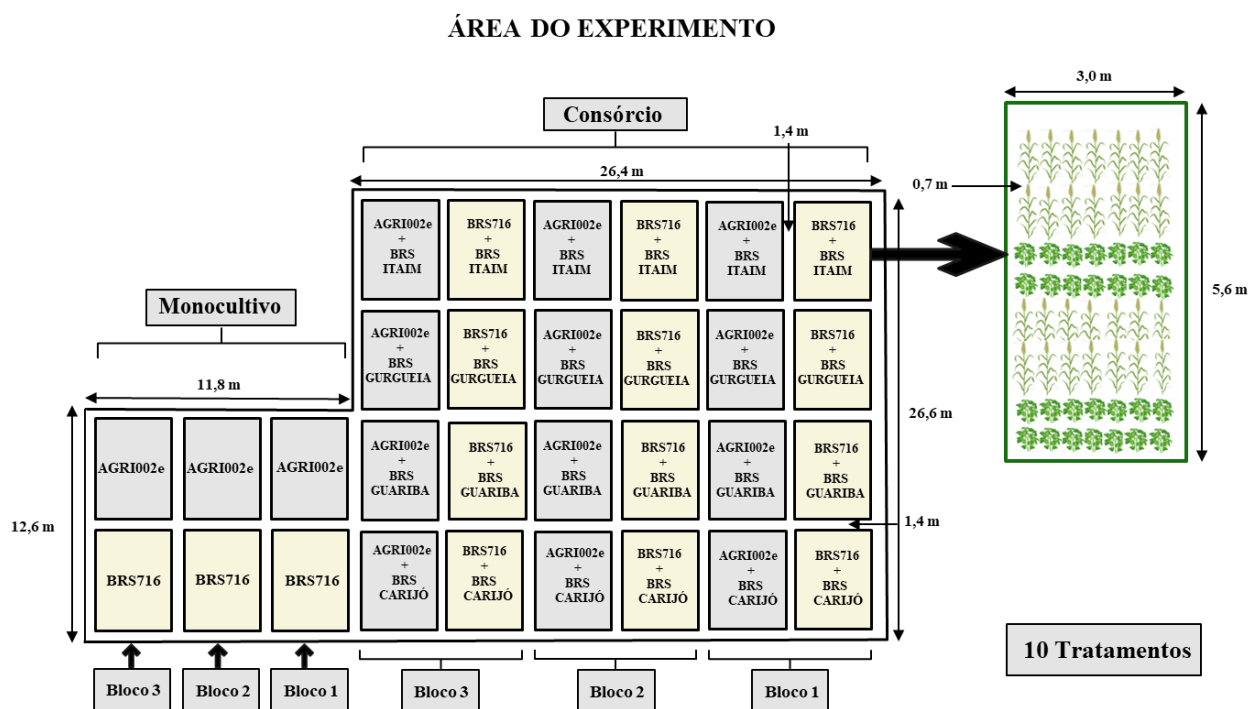
O arranjo das parcelas no campo foi estabelecido conforme a Figura 2. A área total do experimento foi dividida em 30 parcelas distribuídas em monocultivos (seis parcelas) e consórcios (24 parcelas).

Na área do consórcio, as parcelas foram constituídas de oito fileiras de 3,0 m de comprimento cada, com espaçamento entre ruas de 0,70 m e com área total de 16,80 m² (3,0 m x 5,6 m). A distância entre as plantas em cada fileira das parcelas foi de 0,15 m e o número de plantas foi 160 plantas (80 plantas de sorgo biomassa + 80 plantas de feijão-caupi). A área total dos tratamentos consorciados foi de 702,2 m² (26,4 x 26,6). Os tratamentos dentro das parcelas dos consórcios foram distribuídos obedecendo o seguinte padrão: a cada duas linhas de sorgo biomassa, foi plantada duas linhas de feijão-caupi, ou seja, cada parcela apresenta de forma intercalada, quatro fileiras de uma cultivar de feijão-caupi e quatro fileiras de uma cultivar de sorgo biomassa.

Na área destinada aos monocultivos, as parcelas cultivadas de sorgo biomassa foram constituídas de oito fileiras de 3,0 m de comprimento cada, com um espaçamento entre ruas de 0,70 m, totalizando uma área de 16,80 m² (3,0 m x 5,6 m). A distância entre plantas nas fileiras das parcelas foi de 0,15 m e o número de plantas por parcela foi de 160 plantas. A área total dos monocultivos foi de 148,68 m² (12,6 x 11,8). Foram semeadas 14 sementes por metro linear

para ambas as culturas, realizando-se o desbaste após 15 dias, resultando em sete plantas por metro linear.

Figura 02 – Arranjo das Parcelas na área experimental



Fonte: Nascimento (2023)

O estudo foi realizado em duas épocas de plantio, sendo a primeira no período de temperatura mais amenas (média de 25,2° C) e a outra no período de temperatura mais quente (média de 26,0° C). O primeiro ciclo teve uma duração total de 90 dias para a cultura do sorgo e 79 para a cultura do feijão-caupi. Por sua vez, o segundo ciclo teve uma duração de 135 dias para a cultura do sorgo e 77 para a cultura do feijão-caupi.

Antes da implantação do experimento no campo foi realizada a análise do solo, em que se coletou amostras compostas e representativas da camada 0 a 20 cm para caracterização dos atributos físicos e químicos (Tabela 2).

Tabela 02 – Caracterização do solo, na camada de 0 a 20 cm, antes da implantação do experimento no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina-PE.

Profundidade	Areia		Silte		Argila		pH	C.E		
	----- $g\ kg^{-1}$ -----							$dS\ m^{-1}$		
0 – 20 cm	565,09		322,79		112,11		5,68	0,39		
Profundidade	P	K	Na	Ca	Mg	Al	Cu	Fe	Mn	Zn
	$mg\ dm^{-3}$		$cmol_C\ dm^{-3}$				$mg\ dm^{-3}$			
0 – 20 cm	1,3	0,31	0,0	1,87	1,05	0,0	0,3	16,04	30,6	0,7

O manejo da irrigação foi realizado conforme demanda hídrica de cada cultura e as condições pluviométricas de cada ciclo, por meio de gotejamento com fitas posicionadas próximas às linhas de cultivos com espaçamentos de 30 cm entre os gotejadores. A água utilizada na irrigação foi proveniente do Rio São Francisco.

A adubação, tanto de plantio quanto de cobertura, foi realizada conforme resultados da análise de solo e com base nas recomendações de adubações das respectivas culturas e aplicada via fertirrigação. Para a cultura do sorgo, as recomendações de adubação foram feitas de acordo com Santos et al., (2015) e para o feijão-caupi foi com base em Cavalcanti (2008). Foram adicionadas as mesmas quantidades de nutrientes, nos dois ciclos de cultivos. Os dados sobre a adubação estão evidenciados na Tabela 3.

Tabela 03 – Nutrientes aplicados via fertilização nos ciclos de cultivos I e II de sorgo e feijão-caupi, em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina – PE.

P ₂ O ₅	K ₂ O	N	S	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn
----- $kg\ ha^{-1}$ -----										
98,0	106,0	188,0	128,2	98,0	20,0	1,0	2,0	4,0	0,0	2,0

Ao final de cada ciclo houve a colheita tanto do feijão-caupi quanto do sorgo para determinação do teor de matéria seca. A colheita do sorgo foi realizada quando 50% ou mais dos grãos estavam na fase pastosa, enquanto para o feijão-caupi o ponto de colheita foi quando as vagens estavam secas. As plantas foram cortadas a cinco cm do solo e logo após foram pesadas em balanças analíticas para a obtenção da matéria fresca. Na colheita do feijão-caupi, as plantas foram separadas em grãos, vagem, folhas e caule, já na colheita do sorgo, as plantas foram separadas em folhas, colmos e panículas.

4.2 COLETA E ANÁLISE DO SOLO

Além da coleta de solo realizada antes do início do experimento, foi coletado solo ao final de cada ciclo de cultivo. A amostragem foi realizada com o auxílio de um trado manual

do tipo holandês, na profundidade: 0 – 20 cm. A coleta inicial foi realizada para caracterização da área, coletando-se cinco amostras simples, logo após homogeneizadas formando uma amostra composta e representativa para cada parcela do experimento.

Nas amostragens realizadas ao final de cada ciclo, foram consideradas as diferenças entre os tratamentos e seguiu o mesmo procedimento de amostragem da coleta inicial.

Nas parcelas experimentais de consórcio, as coletas das amostras de solo foram feitas de acordo com o mesmo esquema amostral descrito acima, tanto na linha do sorgo (gramíneas) quanto na linha do feijão-caupi (leguminosas). As amostras foram coletadas nas linhas centrais das parcelas experimentais.

As amostras compostas foram secas ao ar e submetidas ao processo de destorroamento e passadas em peneira com malha de abertura de 2 mm. Em seguida as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Solos e Tecidos Vegetais localizado na Embrapa Semiárido e submetidas à análise química para avaliação dos seguintes nutrientes: Fósforo disponível (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn) e Sódio (Na), conforme Teixeira et al., 2017.

Para os nutrientes K, Ca e Mg, o cálculo dos estoques considerou a condição final do solo, a massa molar do nutriente, a densidade do solo e a profundidade da camada amostrada. Já no caso dos nutrientes P, Cu, Fe, Mn e Zn, não foi considerado nos cálculos a massa molar dos nutrientes.

4.3 COLETA E ANÁLISE DAS PLANTAS

Ao final de cada ciclo de cultivo foram coletadas amostras da parte aérea das plantas para determinação da matéria seca e dos teores de nutrientes.

Os procedimentos para coleta das plantas obedeceram aos seguintes critérios: com a finalidade de evitar o efeito de bordadura, foi realizada a coleta amostral aleatória em cinco plantas da linha central de cada parcela experimental.

As amostras de plantas de sorgo biomassa foram separados em folha, colmo e panículas. Após a obtenção da matéria fresca, as amostras foram encaminhadas para a estufa com circulação e renovação de ar (modelo SL-102) a uma temperatura de 60 °C até a obtenção do peso constante para determinação da matéria seca. Após essa etapa, as amostras das cinco plantas foram homogeneizadas em uma amostra única seca.

Em seguida, as amostras foram encaminhadas para o processo de moagem, utilizando um moinho de facas de aço inoxidável do tipo Willey (modelo TE – 680) com peneiras que

variam de 20 mesh a 40 mesh, reduzindo a amostra a um pó fino e, assim, facilitando tanto a sua manipulação quanto assegurando a homogeneização da amostra. Nesse processo, para cada amostra, foram moídas todas as partes do sorgo biomassa (folha, colmo e panículas) juntas. A matéria seca de cada amostra, após a moagem, foi encaminhada ao Laboratório de Solos e Tecidos Vegetais localizado na Embrapa Semiárido e submetida à análise laboratorial para obtenção dos teores dos seguintes elementos: Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn) e Sódio (Na), conforme metodologia de Silva (2009) por meio da extração por digestão ácida a quente.

Para o cálculo dos macronutrientes exportados pela cultura (g/kg) foi utilizada seguinte fórmula:

$$TNE = \frac{TP \times P}{1000}$$

Já para os cálculos dos micronutrientes (mg/kg) foi utilizada a fórmula:

$$TNE = \frac{TP \times P}{1000000}$$

Onde:

TNE = Total de Nutriente Exportado

TP = teor do nutriente exportado pela planta.

P = Produtividade total da cultura.

4.4 CÁLCULO DO BALANÇO DE NUTRIENTES E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Com base nos dados obtidos, foram calculados os balanços de nutrientes de cada tratamento. Os cálculos de balanço levaram em consideração os estoques naturais iniciais juntamente com as entradas de nutrientes no solo (água da chuva, água de irrigação e a adubação mineral) e as saídas de nutrientes por meio da exportação pelas culturas (biomassa aérea total do sorgo).

O balanço de nutrientes foi calculado conforme a fórmula abaixo:

$$BN = TNA - TNE$$

Onde:

BN = Balanço de Nutrientes

TNA = Total de Nutrientes Adicionado é a soma dos nutrientes existentes nos estoques do solo com os aplicados via adubação mineral, precipitação pluviométrica e sistema de irrigação.

TNE = Total de Nutrientes Exportados é a quantidade de nutrientes extraídos pelas culturas.

O total de nutrientes adicionados ao solo (TNA) foi calculado seguindo a fórmula:

$$TNA = ES + AM + AC + AI$$

Onde:

ES = estoques de nutrientes no solo.

AM = nutrientes aportados ao solo via adubação mineral.

AC = nutrientes aportados ao solo via água da chuva.

AI = nutrientes aportados ao solo via água de irrigação.

Os nutrientes aportados ao solo via adubação mineral foram contabilizados levando em consideração as concentrações do nutriente nos fertilizantes utilizados, seguindo a fórmula:

$$AM = \frac{QF \times N(\%)}{100}$$

Onde:

QF = Quantidade de fertilizante aplicado.

N(%) = Percentual do nutriente no fertilizante aplicado.

Os nutrientes aportados ao solo por meio da água da chuva foram calculados com base nos estudos de Brito et al. (2005), em que se multiplicou os teores dos nutrientes encontrados por eles na água da chuva, pelos valores da precipitação pluviométrica ocorrida durante os dois períodos de cultivos (Tabela 7). Em seguida, esses teores foram convertidos em kg/ha.

A quantidade de nutrientes aportados ao solo via água de irrigação foi calculada de acordo com a lâmina de água utilizada nas culturas durante cada ciclo de cultivo e as concentrações desses nutrientes na água.

Nos cálculos dos balanços de enxofre, foram consideradas como entrada no solo apenas os valores referentes a adubação mineral, ou seja, não foram considerados os estoques iniciais tampouco o aporte pela precipitação pluviométrica e pela água de irrigação.

Por sua vez, nos cálculos do balanço de fósforo, ferro, cobre e zinco, considerou-se apenas como entrada no solo os estoques naturais iniciais e a adubação mineral, isto é, não foram considerados as entradas via precipitação pluviométrica e via sistema de irrigação.

Por fim, para o cálculo de balanço do manganês, somente os estoques iniciais do solo foram considerados como entrada de nutriente.

A análise estatística dos dados obtidos foi realizada de forma descritiva, utilizando-se a média e o erro padrão como medidas de tendência central e dispersão, respectivamente. A média foi calculada para fornecer uma estimativa central dos valores observados, enquanto o erro padrão foi utilizado para indicar a precisão das estimativas da média, refletindo a variabilidade dos dados em torno desta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estoques iniciais de nutrientes, mostram o cálcio (Ca) como o macronutriente com maior abundância neste solo, seguido do magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P), respectivamente (Tabela 4). Os solos de regiões semiáridas, incluindo o Nordeste brasileiro, exibem fertilidade natural variável influenciada por diversos fatores, por exemplo, longos períodos de seca e altas taxas de evaporação (CARVALHO; SILVA, 2022), perda da vegetação densa e consequente exposição de camadas de solo (MACEDO et al., 2023), tipos ou classes do solo (SANTOS et al., 2021), relevo (OLIVEIRA et al., 2018), pH, condições de drenagem (BRITO et al., 2017; SAHRAWAT, 2016), entre outros.

Sobre os teores de cálcio, magnésio, potássio e fósforo encontrados no solo no início do primeiro ciclo de cultivo, infere-se que essas concentrações podem estar relacionadas tanto ao material de origem do solo dessa região, quanto aos usos anteriores dessa área e a camada amostrada no experimento.

O cálcio e o magnésio apresentam altas concentrações na camada de 0 a 20 cm do solo (PESSOA et al., 2022), e é um dos macronutrientes com maiores concentrações nos solos da Caatinga, seguido do nitrogênio, potássio, magnésio e fósforo (HOLANDA et al., 2017). Ratificando essa questão, em um estudo realizado por Brito (2010), em que foram avaliados os atributos químicos do solo de 51 municípios de região semiárida dos estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, concluiu-se que os solos apresentam altos teores de cálcio, magnésio e potássio e, que esses resultados, podem estar atrelados, entre outros fatores, à presença de minerais primários facilmente intemperizáveis que liberam esses nutrientes no solo.

O fósforo (P) apresentou os menores estoques iniciais no solo entre os macronutrientes analisados (Tabela 4). Neste sentido, sabe-se que os solos das regiões semiáridas do Brasil, naturalmente, têm baixos teores de fósforo disponível (GAVA et al., 2022; PAVINATO et al., 2020; SANTOS et al., 2023), o que se deve em parte às propriedades específicas do solo dessa região que podem não reter o fósforo de maneira eficiente (HOLANDA et al., 2017; PAVINATO et al., 2020). Além disso, o potencial de erosão influenciado pela mudança de uso da terra, pela conversão da vegetação nativa em áreas de produção agropecuárias, pode fazer com que se alterem significativamente o equilíbrio de nutrientes no solo, e por conseguinte, o fósforo natural fique menos disponível ou seja eliminado antes que possa se acumular em níveis mais altos (GAVA et al., 2022).

Outros fatores que podem influenciar a baixa concentração de P disponível no solo é o alto teor de cálcio (GENG et al., 2022) e a carência de aporte contínuo de material orgânico que ajuda a enriquecer os solos com fósforo (SANTOS et al., 2023; GAVA et al., 2022).

Tabela 4 – Estoque inicial de nutrientes (média) no solo no primeiro ciclo de cultivo (30/06/2021 a 27/09/2021) em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina- PE.

P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
		----- $kg\ ha^{-1}$ -----					
3,77	350,61	1084,6	365,4	0,87	47,56	88,74	2,03

Os valores de estoques iniciais de nutrientes são os mesmos para todos os tratamentos, pois as amostras para a caracterização do solo foram coletadas em toda a área antes da delimitação das parcelas experimentais, conforme descrito na metodologia.

Em relação aos micronutrientes, o manganês é o que apresenta o maior estoque, seguido do ferro (Fe), zinco (Zn) e cobre (Cu) respectivamente (Tabela 4). Os teores médios de manganês nos solos da região semiárida são considerados adequados para a agricultura (COSTA et al., 2023). Esses teores de manganês podem estar associados ao fato de que esse nutriente tende a ficar mais disponível na camada superficial do solo (OLIVEIRA et al., 2018; SANTOS; HERNDON, 2023). Isso ocorre porque durante os períodos de estiagem nessas regiões, há um aumento da serrapilheira no solo (LIMA et al., 2020), principalmente de folhas que é a parte dos vegetais que mais acumula manganês (LAMBERS et al., 2021). Esse aumento substancial da serrapilheira afeta potencialmente os níveis de manganês, pois a decomposição desse material libera minerais, incluindo o manganês, de volta ao solo (LIMA et al., 2020). Ademais, esse mineral pode se ligar à própria matéria orgânica e às frações de argilas, mantendo-se mais acessível nessas camadas superiores do solo (SANTOS; HERNDON, 2023).

Outro fator que contribui para as altas concentrações de Mn é a temperatura do solo, isto é, o calor do solo afeta a disponibilidade de Manganês (HUNDAL et al., 2019), uma vez que pode potencializar reações químicas, transformando-o em formas mais fáceis de serem absorvidas pelos vegetais e assim aumentando sua disponibilidade no solo (ALEJANDRO et al., 2020; KHAN et al., 2015; SPARROW; UREN, 2014).

O cobre é o micronutriente com menor estoque no solo (Tabela 4). Geralmente, os solos de Pernambuco, em comparação com outras regiões do país, apresentam teores naturais mais baixos desse nutriente (BIONDI et al., 2011). Essas baixas concentrações de cobre podem estar

sendo influenciadas pelo material de origem do solo, isto é, rochas que não apresentam grandes quantidades de minerais que contém cobre em sua composição (BIONDI et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2020; ZINN et al., 2020). Neste sentido podemos citar a biotita, que é um dos componentes dos solos de Pernambuco (BIONDI et al., 2011), que apesar de conter cobre em sua composição, a sua solubilidade no solo é limitada (BONEWITZ, 2012), porque o cobre está complexado com outros elementos dificultando sua disponibilização para as plantas (BIONDI et al., 2011; SANTOS et al., 2021).

Os estoques de nutrientes no solo no início do segundo ciclo apresentaram, em comparação à condição inicial, um aumento nos teores de fósforo, cobre, ferro, manganês e zinco (Tabela 5). Esse aumento se deve ao somatório do aporte desses nutrientes, via adubação, ocorrida no início do primeiro ciclo de cultivo, os seus estoques iniciais e a quantidade desses elementos essenciais demandada pelas plantas de sorgo. Pesquisas evidenciam que o fósforo (LI et al., 2022), o cobre (KUZIEMSKA et al., 2020), o ferro, o zinco (JANARDHAN et al., 2020) e o manganês, aumentam seus estoques no solo quando são adubados com fertilizantes fosfatados (superfosfato simples) e sulfatados, principalmente nas camadas superficiais, devido às impurezas desses fertilizantes (CARVALHO et al., 2015; PRESTON et al., 2017).

Outro fator que contribuiu para o aumento nos teores dos elementos citados acima, foi a baixa demanda da cultura do sorgo por esses nutrientes comparando com o K, Ca, Mg e S. Cavalcante et al. (2018) concluíram que essa cultura apresenta uma ordem específica de absorção dos nutrientes essenciais, começando com o K como o nutriente mais absorvido, seguido por N, depois o Ca, Mg, S, P, Fe, Zn, Mn e finalmente o Cu.

Embora os estoques de micronutrientes no início do segundo ciclo de cultivo tenha aumentado, observou-se que alguns tratamentos apresentaram teores menores quando comparado com o primeiro ciclo de cultivo (Tabela 5). Vale ressaltar que, em todos os tratamentos, foram adicionados ao solo no primeiro ciclo, via adubação, 2,0 kg de sulfato de cobre (CuSO_4), 4,0 kg de sulfato de ferro (FeSO_4) e 2,0 kg de sulfato de zinco (ZnSO_4).

Tabela 5 – Estoque de nutrientes (média $\pm$ erro padrão) no solo no início do segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022) em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina- PE.

Tratamentos	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
			----- $kg\ ha^{-1}$ -----					
BRS 716	34,56 $\pm$ 11,80	158,34 $\pm$ 19,59	696,00 $\pm$ 0,00	208,8 $\pm$ 34,80	3,79 $\pm$ 1,71	51,43 $\pm$ 17,22	60,92 $\pm$ 2,90	78,24 $\pm$ 6,58
Agri002e	47,66 $\pm$ 45,08	147,03 $\pm$ 19,59	831,33 $\pm$ 120,74	240,12 $\pm$ 40,13	2,38 $\pm$ 0,46	37,77 $\pm$ 9,98	60,4 $\pm$ 8,00	55,23 $\pm$ 7,90
BRS716 + BRS Itaim	55,86 $\pm$ 42,39	241,28 $\pm$ 58,04	1044 $\pm$ 252,82	324,8 $\pm$ 111,87	3,68 $\pm$ 0,99	128,25 $\pm$ 14,40	116,98 $\pm$ 5,44	87,96 $\pm$ 113,61
Agri002e + BRS Itaim	29,35 $\pm$ 11,35	267,67 $\pm$ 58,04	1024,67 $\pm$ 145,96	278,4 $\pm$ 69,60	3,62 $\pm$ 0,73	134,3 $\pm$ 25,74	114,89 $\pm$ 1,73	90,17 $\pm$ 13,83
BRS716 + BRS Gurgueia	42,08 $\pm$ 25,80	358,15 $\pm$ 104,48	870 $\pm$ 153,45	266,8 $\pm$ 40,18	3,68 $\pm$ 0,9	86,26 $\pm$ 53,88	112,09 $\pm$ 10,15	168,55 $\pm$ 145,38
Agri002e + BRS Gurgueia	40,76 $\pm$ 7,66	520,26 $\pm$ 174,12	908,67 $\pm$ 234,40	278,4 $\pm$ 92,07	3,3 $\pm$ 0,32	128,89 $\pm$ 2,74	110,78 $\pm$ 9,32	289,88 $\pm$ 76,56
BRS716 + BRS Guariba	38,94 $\pm$ 20,65	294,06 $\pm$ 78,36	966,67 $\pm$ 133,95	278,4 $\pm$ 60,28	2,88 $\pm$ 0,26	176,19 $\pm$ 114,36	96,69 $\pm$ 4,45	259,07 $\pm$ 48,64
Agri002e + BRS Guariba	31,92 $\pm$ 2,72	294,06 $\pm$ 70,63	1005,33 $\pm$ 133,95	290 $\pm$ 53,16	3,43 $\pm$ 0,59	121,56 $\pm$ 7,78	98,5 $\pm$ 12,55	157,57 $\pm$ 123,65
BRS716 + BRS Carijó	35,25 $\pm$ 10,54	241,28 $\pm$ 26,12	715,33 $\pm$ 33,49	208,8 $\pm$ 0,00	3,08 $\pm$ 0,32	167,77 $\pm$ 87,39	80,05 $\pm$ 6,24	133,11 $\pm$ 75,71
Agri002e + BRS Carijó	51,89 $\pm$ 34,43	252,59 $\pm$ 36,36	715,33 $\pm$ 33,49	232 $\pm$ 40,18	2,68 $\pm$ 0,21	125,47 $\pm$ 8,67	78,51 $\pm$ 6,63	161,2 $\pm$ 94,54

Ainda sobre os micronutrientes, os estoques de Zinco foram os que mais aumentaram no início do segundo ciclo de cultivo e isso pode estar atrelado tanto pela adubação sulfatada, mencionada anteriormente (SANTOS et al., 2019) quanto por outros fatores, por exemplo, a redução da capacidade de absorção desse nutriente pelas plantas de sorgo biomassa influenciada por interações com outros nutrientes presentes no solo e as condições de acidez e alcalinidade do solo (MOSSA et al., 2021; PINTO, 2021).

Neste último caso, o pH do solo influencia significativamente na disponibilidade de zinco, principalmente quando apresentam valores abaixo de 6,0 (MOSSA et al., 2021). Corroborando com essa questão, Pinto (2021) em seus estudos, afirmou que a faixa ideal de pH para aumentar a disponibilidade de zinco no solo está entre 5,5 e 6,5 e que em níveis acima de 7,5 a disponibilidade diminui consideravelmente.

Vale ressaltar que o experimento foi mantido sob irrigação controlada e de acordo com estudos, o teor de água no solo também afeta a disponibilidade de zinco (BARUAH, 2018; HUSSAIN et al., 2020). A quantidade de água no solo influencia a solubilidade do zinco uma vez que aumenta os níveis de umidade, e isso é fundamental no processo de difusão que transporta o Zn para as raízes das plantas, tornando-o mais acessível (HUSSAIN et al., 2020). Desse modo, é indispensável a manutenção dos níveis adequados de água no solo, porque o solo muito seco ou muito úmido pode afetar a solubilidade de zinco e por consequência sua disponibilidade (ALMENDROS et al., 2015; NAIK; DAS, 2020).

Os estoques dos macronutrientes no início do segundo ciclo diminuíram, principalmente para o potássio, cálcio e magnésio (Tabela 5). Alguns fatores possivelmente influenciaram essa diminuição, entre eles podemos citar: as possíveis perdas desses nutrientes por lixiviação (MENDES et al., 2016; ZHOU et al., 2024), a sorção à fração sólida do solo (ARBAČAUSKAS et al., 2023), bem como a exportação desses elementos pelas culturas do sorgo e do feijão-caupi, principalmente nos tratamentos solteiros. Observou-se que o estoque de cálcio foi o mais reduzido entre os macronutrientes, seguido do magnésio e potássio. Sobre essa questão, estudos demonstram que tanto o sorgo biomassa quanto o feijão-caupi apresentam característica de absorver esses nutrientes do solo com uma maior afinidade (ARAYA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2019; YOSHIMOTO et al., 2023; ZANDONADI et al., 2017).

Aporte de nutrientes via água de Irrigação

O nutriente mais aportado ao solo por meio da irrigação foi magnésio, seguido do cálcio, sódio e potássio (Tabela 6). As diferenças entre os teores de nutrientes em cada ciclo foram influenciadas pela demanda hídrica das culturas do sorgo biomassa e do feijão-caupi que levou

à aplicação de diferentes volumes de água via irrigação nos dois ciclos de cultivos. Durante o primeiro ciclo, o volume de chuvas na região foi reduzido, isto é, choveu apenas 21 mm (Tabela 7), e isso acarretou um aumento na frequência de irrigação (365,38 mm). Por outro lado, durante o segundo ciclo, houve um aumento no volume de chuvas na região (aproximadamente 340 mm) e, como consequência, houve uma redução da frequência de irrigação. Essa dinâmica influenciou diretamente o aporte de nutriente ao solo.

Tabela 6 – Aporte de nutrientes pela água de irrigação nos ciclos I e II de cultivos de sorgo, em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina – PE.

	Lâmina de água ---- mm ----	K	Na	Ca	Mg
			-----kg ha ⁻¹ -----		
Ciclo I	365,38	13,54	62,19	195,84	334,98
Ciclo II	123,58	4,58	21,03	66,24	113,3

Teores de nutrientes baseados nas análises químicas da água de irrigação do campo experimental da Embrapa Semiárido Ciclo I: 30/06/2021 a 27/09/2021; Ciclo II: 21/12/2021 a 04/05/2022.

Aporte de nutrientes via precipitação pluviométrica

Os dados sobre o aporte de nutrientes no solo pelas chuvas durante os ciclos de cultivos I e II indicam uma grande diferença entre eles, em função da quantidade de chuva acumulada nos dois períodos (Tabela 7). O cálcio (Ca) foi o nutriente mais aportado ao solo em ambos os ciclos, seguidos pelo potássio (K), magnésio (Mg) e do elemento benéfico sódio (Na), respectivamente. Sobre essa questão, Deusdará et al. (2017), afirmaram em seus estudos sobre teores de elementos químicos presentes na água da chuva durante duas estações chuvosas em uma região semiárida, que os elementos com maiores concentrações na água da chuva foram o cálcio (Ca²⁺), o potássio (K⁺) e o nitrogênio (N) nas formas de amônio (NH₄⁺) e nitrato (NO₃⁻).

Essa variação na precipitação pluviométrica durante as épocas de plantio dos ciclos I e II é uma característica do semiárido brasileiro. Essa região, embora apresente temperaturas elevadas na maior parte do ano, é comum haver uma variação sazonal em suas condições climáticas, principalmente no que diz respeito as precipitações pluviométricas (INSA, 2023).

No ciclo I, observou-se uma precipitação acumulada de 21 mm. Essa quantidade de chuva, embora relativamente baixa, é condizente com as condições climáticas típicas da estação menos quente do ano (BEZERRA et al., 2021; LOPES et al., 2020). Por sua vez, o ciclo II exibiu uma notável elevação nos níveis de precipitação, atingindo 340 mm de precipitação

acumulada, o que está relacionado às condições climáticas deste período do ano na região (BEZERRA et al., 2021; INSA, 2023).

Tabela 7 – Aporte de nutrientes pela água da chuva nos ciclos I e II de cultivos de sorgo e feijão-caupi, em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina – PE.

	Precipitação	K	Ca	Mg	Na
	---- mm ----	----- kg ha ⁻¹ -----			
Ciclo I	21	5,08	18,40	3,58	1,55
Ciclo II	340	82,21	297,84	57,94	25,02

Ciclo I: 30/06/2021 a 27/09/2021; Ciclo II: 21/12/2021 a 04/05/2022. Teores de nutrientes da água da chuva com base em Brito et al. (2005).

Exportação de nutrientes pelas plantas de sorgo

Os teores de macronutrientes exportados pela cultura do sorgo nos dois ciclos de cultivos, apresentaram, de um modo geral, em todos os tratamentos solteiros, o potássio como o nutriente mais exportado pela cultura e o fósforo como o nutriente menos exportado pelas culturas (Tabelas 8 e 9). No que diz respeito aos tratamentos consorciados, de um modo geral, o potássio também foi o nutriente mais exportado nos dois ciclos, no entanto, os nutrientes menos exportados diferiram entre os ciclos, sendo o magnésio o menos exportado no primeiro ciclo e o fósforo menos exportado no segundo ciclo. Tanto a exportação quanto o acúmulo dos nutrientes nas plantas, variam em função de inúmeros fatores como adubação, clima, fertilidade do solo, nível de produção, espécie vegetal ou cultivar, práticas de manejo etc. (PRADO, 2021; SOUZA et al., 2023).

A cultura do sorgo tem uma alta demanda por potássio e nitrogênio para a produção de biomassa (ABOOD; SALH, 2018; MAY et al., 2020; SANTOS et al., 2015). Segundo Cavalcante et al. (2018), essa alta demanda de sorgo por potássio está atrelada ao papel significativo que esse nutriente tem na regulação da água dentro da planta, o que pode contribuir indiretamente para sua tolerância ao estresse hídrico, mantendo o equilíbrio hídrico e auxiliando os processos fisiológicos.

Tabela 8 – Exportação de nutrientes pelas plantas de sorgo (média $\pm$ erro padrão) no final do ciclo I (30/06/2021 a 27/09/2021) em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina – PE

Tratamentos	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
			----- $kg\ ha^{-1}$ -----							
BRS 716	20,17 $\pm$ 7,87	124,56 $\pm$ 35,13	27,13 $\pm$ 3,5	29,43 $\pm$ 5,23	23,02 $\pm$ 12,78	0,8 $\pm$ 0,35	0,27 $\pm$ 0,08	2,17 $\pm$ 0,53	1,47 $\pm$ 0,16	0,44 $\pm$ 0,1
Agri002e	35,73 $\pm$ 10,49	199,2 $\pm$ 43,56	51,06 $\pm$ 25,62	45,54 $\pm$ 10,54	64,7 $\pm$ 23,64	1,48 $\pm$ 0,16	0,45 $\pm$ 0,09	3,4 $\pm$ 0,77	2,66 $\pm$ 1,21	0,72 $\pm$ 0,14
BRS716 + BRS Itaim	10,85 $\pm$ 3,05	62,84 $\pm$ 27,35	13,76 $\pm$ 1,12	10,95 $\pm$ 1,51	13,6 $\pm$ 7,88	0,33 $\pm$ 0,15	0,11 $\pm$ 0,03	0,88 $\pm$ 0,24	0,55 $\pm$ 0,18	0,22 $\pm$ 0,01
Agri002e + BRS Itaim	23,13 $\pm$ 11,63	86,69 $\pm$ 36,13	26,64 $\pm$ 12,2	16,86 $\pm$ 4,06	26,01 $\pm$ 2,78	0,62 $\pm$ 0,51	0,2 $\pm$ 0,08	1,52 $\pm$ 0,42	1,12 $\pm$ 0,38	0,46 $\pm$ 0,13
BRS716 + BRS Gurgueia	13,13 $\pm$ 1,82	68,48 $\pm$ 24,76	26,72 $\pm$ 13,71	13,28 $\pm$ 0,83	10,3 $\pm$ 2,86	0,36 $\pm$ 0,18	0,14 $\pm$ 0,02	1,02 $\pm$ 0,25	0,53 $\pm$ 0,04	0,28 $\pm$ 0,01
Agri002e + BRS Gurgueia	17,57 $\pm$ 5,93	88,08 $\pm$ 18,79	23,93 $\pm$ 10,69	16,41 $\pm$ 4,51	26,71 $\pm$ 20,73	0,65 $\pm$ 0,23	0,19 $\pm$ 0,04	1,58 $\pm$ 0,4	1,01 $\pm$ 0,42	0,41 $\pm$ 0,13
BRS716 + BRS Guariba	18,93 $\pm$ 9,32	69,7 $\pm$ 8,39	23,93 $\pm$ 4,52	16,41 $\pm$ 0,66	26,71 $\pm$ 5,06	0,65 $\pm$ 0,05	0,19 $\pm$ 0,01	1,58 $\pm$ 0,36	1,01 $\pm$ 0,16	0,41 $\pm$ 0,04
Agri002e + BRS Guariba	17,14 $\pm$ 1,6	69,45 $\pm$ 14,04	23,62 $\pm$ 11,83	14,57 $\pm$ 0,42	22,54 $\pm$ 12,54	0,52 $\pm$ 0,25	0,16 $\pm$ 0,01	1,21 $\pm$ 0,16	0,72 $\pm$ 0,35	0,3 $\pm$ 0,02
BRS716 + BRS Carijó	20,62 $\pm$ 10,53	64,78 $\pm$ 12,56	15,44 $\pm$ 7,13	13,15 $\pm$ 3,05	8,68 $\pm$ 2,39	0,32 $\pm$ 0,17	0,14 $\pm$ 0,01	1,06 $\pm$ 0,24	0,71 $\pm$ 0,15	0,34 $\pm$ 0,04
Agri002e + BRS Carijó	19,44 $\pm$ 2,01	85,55 $\pm$ 29,15	20,9 $\pm$ 7,99	17,76 $\pm$ 1,68	39,65 $\pm$ 37,23	0,5 $\pm$ 0,17	0,2 $\pm$ 0,03	1,56 $\pm$ 0,23	1,37 $\pm$ 0,34	0,48 $\pm$ 0,1

Tabela 9 – Exportação de nutrientes pelas plantas de sorgo (média $\pm$ erro padrão) no final do ciclo II (21/12/2021 a 04/05/2021) em um Argissolo no Campo Experimental da Caatinga, em Petrolina – PE

Tratamentos	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- $kg\ ha^{-1}$ -----									
BRS 716	65,46 $\pm$ 10,35	215,16 $\pm$ 27,28	75,91 $\pm$ 15,74	131,84 $\pm$ 15,72	278,64 $\pm$ 40,29	2,85 $\pm$ 0,53	1,12 $\pm$ 0,11	4,9 $\pm$ 0,71	2,81 $\pm$ 0,16	3,32 $\pm$ 0,5
Agri002e	68,91 $\pm$ 10,94	275,18 $\pm$ 32,2	101,26 $\pm$ 16,42	156,72 $\pm$ 18,89	147,5 $\pm$ 79,86	3,69 $\pm$ 1,77	1,38 $\pm$ 0,14	5,34 $\pm$ 1,77	3,58 $\pm$ 0,77	3,94 $\pm$ 0,54
BRS716 + BRS Itaim	31,24 $\pm$ 7,00	144,88 $\pm$ 41,06	54,91 $\pm$ 26,61	64,45 $\pm$ 11,64	68,23 $\pm$ 62,71	1,36 $\pm$ 0,13	0,52 $\pm$ 0,06	7,6 $\pm$ 8,62	1,43 $\pm$ 0,17	1,37 $\pm$ 0,52
Agri002e + BRS Itaim	30,53 $\pm$ 8,27	138,87 $\pm$ 45,73	52,46 $\pm$ 41,49	69,94 $\pm$ 28,66	45,05 $\pm$ 18,35	1,48 $\pm$ 0,2	0,55 $\pm$ 0,18	3,27 $\pm$ 2,33	1,69 $\pm$ 0,34	1,55 $\pm$ 0,82
BRS716 + BRS Gurgueia	37,83 $\pm$ 6,24	144,18 $\pm$ 15,97	44,51 $\pm$ 36,2	54,44 $\pm$ 27,99	98,14 $\pm$ 74,41	1,35 $\pm$ 0,37	0,55 $\pm$ 0,25	47,85 $\pm$ 40,53	1,18 $\pm$ 0,29	1,38 $\pm$ 0,91
Agri002e + BRS Gurgueia	31,71 $\pm$ 3,09	144,21 $\pm$ 5,55	45,5 $\pm$ 30,03	62,85 $\pm$ 29,41	44,98 $\pm$ 15,71	1,49 $\pm$ 0,24	0,55 $\pm$ 0,24	4,08 $\pm$ 3,72	1,55 $\pm$ 0,42	1,56 $\pm$ 0,92
BRS716 + BRS Guariba	37,89 $\pm$ 5,70	184,17 $\pm$ 78,78	75,34 $\pm$ 26,62	68,61 $\pm$ 7,98	48,25 $\pm$ 26,7	1,85 $\pm$ 0,22	0,71 $\pm$ 0,07	8,06 $\pm$ 5,14	1,11 $\pm$ 0,42	2,01 $\pm$ 0,08
Agri002e + BRS Guariba	44,28 $\pm$ 12,09	193,38 $\pm$ 97,6	81,98 $\pm$ 38,98	89,08 $\pm$ 37,85	57,39 $\pm$ 1,5	1,96 $\pm$ 0,36	0,68 $\pm$ 0,19	4,55 $\pm$ 3,18	1,77 $\pm$ 0,82	1,98 $\pm$ 0,87
BRS716 + BRS Carijó	31,36 $\pm$ 7,45	162,06 $\pm$ 82,39	42,75 $\pm$ 8,48	68,52 $\pm$ 18,1	118,19 $\pm$ 79,06	1,72 $\pm$ 0,26	0,58 $\pm$ 0,11	5,61 $\pm$ 4,64	1,41 $\pm$ 0,47	1,63 $\pm$ 0,64
Agri002e + BRS Carijó	45,14 $\pm$ 1,91	209,09 $\pm$ 104,08	61,86 $\pm$ 9,28	88,14 $\pm$ 30,36	44,87 $\pm$ 20,89	1,9 $\pm$ 0,16	0,68 $\pm$ 0,17	10,82 $\pm$ 8,92	2,17 $\pm$ 0,84	1,83 $\pm$ 0,98

Nos dois ciclos de cultivos, os tratamentos solteiros exportaram as maiores quantidades de nutrientes comparados aos tratamentos consorciados com as cultivares de feijão-caupi. Isso se deu por causa do número de plantas de sorgo nos dois sistemas, isto é, parte do estande de sorgo nos sistemas consorciados, foi substituído por outra espécie vegetal que não acumula e exporta tanto nutriente.

Por sua vez, entre os tratamentos solteiros, tanto no primeiro quanto no segundo ciclo, a cultivar de sorgo Agri002e apresentou os maiores teores de exportação em todos os nutrientes em relação a cultivar de sorgo BRS716 (Tabelas 08 e 09). Essas quantidades de nutrientes exportados pelas plantas de sorgo podem ser explicadas pela sua alta produtividade (SOUZA et al., 2023) nos dois ciclos, principalmente no segundo. No presente trabalho, as produtividades dos cultivos solteiros de Agri002e e BRS716 foram de 27,7 Mg/ha e 15,2 Mg/ha no primeiro ciclo e de 52,1 Mg/ha e 63,9 Mg/ha no segundo ciclo.

Especificamente sobre a cultivar Agri002e, de sorgo biomassa, Matos e Anjos (2022) destacaram-na como uma das cultivares que se caracteriza por altas produtividades, o que resulta, por conseguinte, na exportação de uma maior quantidade de nutrientes do solo. A título de exemplo, estudos publicados por Rosa et al. (2022) e por Matos e Anjos (2022) apresentaram produtividade dessa cultivar de sorgo variando de 28,77 Mg/ha de biomassa seca até 140 Mg/ha de biomassa verde. Ademais, outros estudos demonstram que não somente a cultivar de sorgo Agri002e, mas também a cultivar BRS 716 apresentam grandes potenciais para alcançar altas produtividades (BATISTA et al., 2018; CASTRO et al., 2015; CASTRO et al., 2022).

Em que pese os monocultivos apresentarem, em sua maioria, exportações maiores do que aquelas apresentadas pelos tratamentos consorciados, alguns tratamentos consorciados apresentaram, em certa medida, exportações maiores de determinados nutrientes quando comparados com os tratamentos solteiros. É o caso do tratamento consorciado BRS716 + BRS Guariba que apresentou um aumento de mais de 10% na exportação de enxofre (26,71 kg/ha) quando comparado com o tratamento solteiro BRS716 (23,02 kg/ha).

Este comportamento pode ser atribuído às quantidades de fósforo exportados pelas plantas de sorgo nesse tratamento. Vale ressaltar que esse tratamento consorciado foi um dos que mais exportaram fósforo do solo e, de acordo com Leão et al. (2011), os teores de fósforo no solo influenciam positivamente a exportação de enxofre pelas de sorgo biomassa. Ademais, a cultivar de feijão-caupi BRS Guariba, consorciada nesse tratamento com o sorgo BRS716, não demanda uma alta quantidade de enxofre para atingir seu crescimento vegetativo (PEREIRA et al., 2021), o que pode ter permitido maior quantidade de enxofre disponível para absorção pelas plantas de sorgo no consórcio.

Em relação aos micronutrientes mais exportados pelas plantas de sorgo no primeiro ciclo, o ferro foi o mais exportado, seguido do manganês, zinco e cobre, enquanto, no segundo ciclo, o ferro foi o mais exportado, seguido do zinco, manganês e cobre (Tabelas 8 e 9). Apesar de estudos revelarem o zinco e o ferro como os micronutrientes mais exportados pelas plantas de sorgo biomassa (CHOUDHARY et al., 2017; MARKOLE et al., 2020; MEHERA et al., 2023), observou-se uma exportação maior de ferro e manganês nas plantas no primeiro ciclo de cultivo.

Os tratamentos consorciados, nos dois ciclos de cultivos, apresentaram teores de exportação de micronutrientes menores comparados com os tratamentos solteiros. Essa questão está associada tanto a redução do número de planta de sorgo nesses sistemas de cultivos quanto à competição por nutrientes do solo quando sorgo biomassa é cultivado em sistemas consorciados com feijão-caupi, uma vez que, tanto as cultivares de sorgo quanto as de feijão-caupi têm características de altas produtividades. Neste sentido, Afe et al. (2023) indicam que há uma interação competitiva entre as plantas de feijão-caupi e sorgo biomassa quando elas são cultivadas juntas, e que esse comportamento competitivo é destacado pelas diferenças de rendimento de grãos e nas taxas de crescimentos, já que algumas cultivares de feijão-caupi afetam a produtividade do sorgo.

Estudos afirmam que as temperaturas do solo influenciam tanto a disponibilidade de micronutrientes no solo quanto a absorção pelas plantas (BHAGAT et al., 2022; CHARI et al., 2021; DORAU et al., 2018). Neste sentido, os teores de ferro exportados pelas plantas podem ter sido influenciados pelas altas temperaturas do solo, principalmente no segundo ciclo, já que nesse período do ano, as temperaturas foram maiores em comparação com o ciclo de cultivo anterior.

Sendo assim, o manganês também tem, tanto a sua disponibilidade no solo quanto a absorção pelas plantas, impactadas pelas altas temperaturas do solo (MUNIR et al., 2021; BHAGAT et al., 2022). Isso é possível porque as temperaturas mais altas podem afetar a química do solo e a atividade microbiana, aumentando as taxas de reações químicas no solo e favorecendo a solubilidade desse micronutriente, tornando-o mais disponível para a absorção pelas plantas (BHAGAT et al., 2022).

Apesar dos micronutrientes, de um modo geral, serem demandados em quantidades muito pequenas pelas culturas, o zinco é exportado pelo sorgo biomassa em quantidades significativas (MAY et al., 2020). Em um estudo realizado por Nazari et al. (2022), apontaram que os teores de zinco na biomassa do sorgo cultivado sob irrigação e dependendo de outros fatores como solo, clima e tipo de genótipo, variam de 1,65 mg/kg até 20,34 mg/kg. Além disso,

as quantidades exportadas dependem, entre outros fatores, da concentração desse nutriente em seu ambiente de cultivo, isto é, teores mais altos de zinco no solo levam a maior exportação (BADAMASI; DAGARI, 2019; STALIN et al., 2011).

A presença de enxofre, fósforo, potássio e cálcio no solo também podem afetar a absorção de zinco pela cultura do sorgo (ŠKOLNÍKOVÁ; ŠKARPA, 2019). A título de exemplo, tem-se a absorção de zinco influenciada pela interação com fósforo. A fertilização fosfatada aumenta, em muito caso, os estoques desse nutriente no solo e isso proporciona uma maior disponibilidade de zinco no solo e conseqüentemente uma maior absorção pelas plantas de sorgo. Isso acontece porque o fósforo pode interagir com o zinco, evitando que o zinco se ligue muito fortemente às partículas do solo o que, de outra forma, o tornaria menos disponível para as plantas (SANTOS, 2018).

Outro fator diz respeito a influência especificamente do nitrogênio na exportação de zinco, pois os sistemas consorciados entre o sorgo e feijão-caupi podem contribuir no aumento da concentração de zinco pela parte aérea do sorgo. Isso acontece porque a FBN, ao adicionar nitrogênio no solo e aumentar a atividade microbiana, proporciona níveis maiores de produtividade das culturas e, por conseguinte, o aumento da extração de nutrientes, inclusive o zinco (MUSTAFAYEV, 2019).

Balanço dos nutrientes

O balanço de nutrientes pode ser caracterizado pela diferença entre a quantidade de nutrientes que são aportados ao sistema solo-planta por meio de diversas fontes como adubação, decomposição da matéria orgânica, água de irrigação, precipitação pluviométrica, mineralização pelos microrganismos etc., e a quantidade de nutrientes que saem do sistema por meio da extração e exportação das culturas, volatilização, lixiviação entre outros (RAIJ, 2011). Sendo assim, o conhecimento do balanço de nutrientes se configura uma estratégia essencial para a agricultura, já que tanto falta quanto o excesso destes no solo, pode desencadear uma série de problemas nos sistemas de produção (SALEEM et al., 2023).

Em contrapartida, algumas pesquisas, levando em consideração a sustentabilidade a longo prazo, veem o balanço de nutrientes próximo ou igual a zero como o ideal. Isso indicaria, na visão desses estudos, uma utilização eficiente dos nutrientes no sistema, e assim, evitaria o acúmulo e excesso de nutrientes que podem levar à contaminação ambiental (BHATTACHARYYA et al., 2021)

Os dados referentes ao balanço de macronutrientes tanto no primeiro ciclo quanto no segundo ciclo apresentaram valores positivos para todos os nutrientes, com exceção para o

enxofre que apresentou balanço negativo para o sistema de cultivo solteiro durante o segundo ciclo (Figuras 3 e 4). Excetuando alguns tratamentos, os dados referentes aos balanços de nutrientes do primeiro ciclo mostram uma diferença quase nula entre eles.

O balanço de fósforo ficou positivo nos dois ciclos de cultivos, tanto nos cultivos solteiros quanto nos cultivos consorciados. Ao compararmos os cultivos solteiros, no primeiro ciclo, observa-se o sorgo BRS716 com um balanço de fósforo superior ao do sorgo Agri002e. Entretanto, no segundo ciclo, há uma inversão e o sorgo Agri002e apresenta um balanço superior ao sorgo BRS716.

No primeiro ciclo, nos cultivos consorciados com o feijão-caupi BRS Itaim e com o feijão-caupi BRS Gurgueia, o sorgo BRS716 apresentou balanço de fósforo superior ao sorgo Agri002e, porém, nos cultivos consorciados com o feijão-caupi BRS Guariba e com o feijão-caupi BRS Carijó, o sorgo Agri002e apresentou um balanço levemente maior em relação ao sorgo BRS716 (Figura 03). Já no segundo ciclo, o sorgo BRS716 nos tratamentos consorciados com as cultivares de feijão-caupi BRS Itaim e BRS Guariba apresentou os maiores balanços de fósforo, enquanto nos demais tratamentos, o sorgo Agri002e apresentou os maiores balanços.

A adubação fosfatada para essas culturas é crucial (SOUZA et al., 2022), pois um balanço positivo de fósforo é um indicativo que as práticas de fertilização foram eficazes e que apesar da grande interação do fósforo com a fração sólida do solo, o aporte de P nas áreas de cultivos, está compensando as exportações pela cultura do sorgo. Nesse quesito, vale ressaltar que a exportação de fósforo pelas plantas de sorgo, tanto nos sistemas solteiros quanto nos sistemas consorciados foram as menores entre os macronutrientes analisados, isto é, uma parte considerável do P aplicado não foi extraído pela cultura e nem foi sorvido pela parte sólida do solo, ficando disponível no solo e conseqüentemente favorecendo um balanço positivo.

O potássio apresentou um balanço positivo em todos os tratamentos nos dois ciclos de cultivos. No primeiro ciclo, o sorgo BRS716 se destacou como a cultivar que apresentou os maiores balanços tanto nos cultivos solteiros quanto nos cultivos consorciados (Figura 03). Já no segundo ciclo, o destaque entre todos os tratamentos foi o sorgo Agri002e que apresentou balanço maior quando foi consorciado com a cultivar de feijão-caupi BRS Gurgueia (Figura 04).

O balanço de potássio pode ter sido influenciado positivamente devido a fertilização do solo com o cloreto de potássio (KCl) (SANTOS et al., 2015), como já reportados para outros estudos no semiárido nordestino (SANTOS et al., 2020; SILVA et al., 2017). Além disso, o balanço positivo, pode estar relacionado com a irrigação e as precipitações pluviométricas ocorridas no segundo ciclo de cultivo. Isto é, além das doses aplicadas via fertilizantes (108

kg/ha de K_2O), a água de irrigação juntamente com a água da chuva aportou ao solo aproximadamente 86 kg/ha de potássio

Por outro lado, os balanços de K nos sistemas consorciados foram maiores do que os balanços nos sistemas solteiros. É bem provável que essa diferença esteja relacionada as produtividades do sorgo cultivado sozinho comparado com o sorgo consorciado com o feijão-caupi. Os sistemas solteiros apresentaram maiores produtividades e, portando, exportaram mais nutrientes do solo em comparação com os sistemas consorciados, provocando um exaurimento mais acentuado desse nutriente nesses tratamentos. Neste sentido, estudos afirmam que quanto maior a exportação de potássio por meio da biomassa do sorgo maior será a tendência de esgotamento dos níveis desse nutriente no solo e assim impactando negativamente no seu balanço (CAVALCANTE et al., 2018; ZAITUNIGULI et al., 2021).

A saúde e fertilidade do solo são aspectos fundamentais quando se trata de balanço positivo desse nutriente, dados os diversos benefícios que esse macronutriente executa no sistema solo-planta, principalmente no auxílio da movimentação da água, nutrientes e carboidratos dentro do tecido vegetal (MISAL; SINGH, 2022), na melhoria da eficiência da fotossíntese e da produção de energia (ISINKARALAR; ERDEM, 2022), além de desempenhar um papel crucial na capacidade das plantas de resistir a doenças e a seca, melhorando a saúde geral e a resiliência das plantas (KUMAR et al., 2022; BAHADUR et al., 2016).

Por sua vez, um balanço positivo de potássio pode impactar diretamente as aplicações desse nutriente no solo, uma vez que solos que apresentem uma saturação de potássio adequada à demanda da cultura, podem ter a necessidade de fertilização com potássio reduzida (SILVA et al., 2020).

Figura 03 – Balanço de Macronutrientes no sorgo no primeiro ciclo de cultivo (30/06/2021 a 27/09/2021).

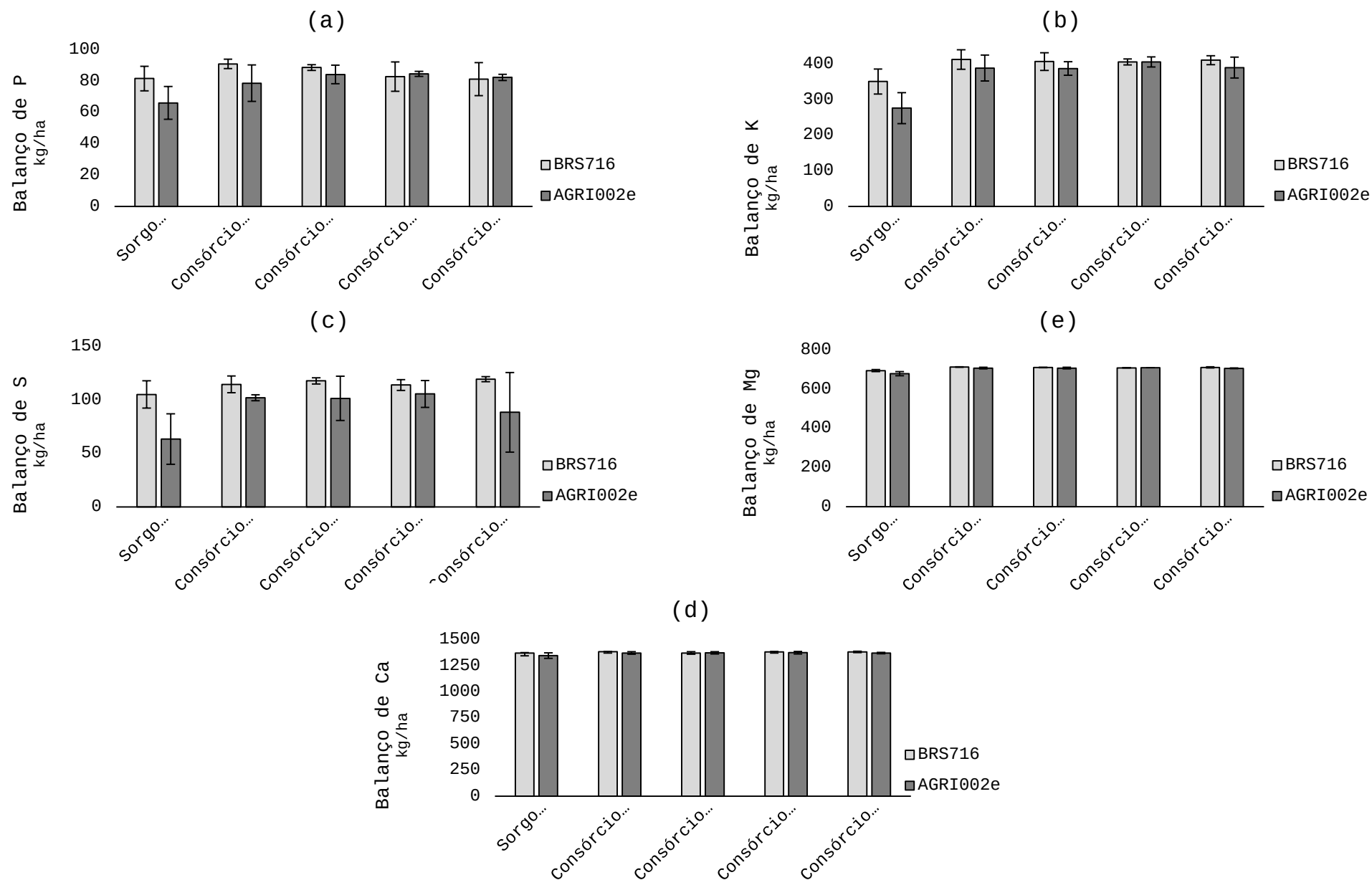
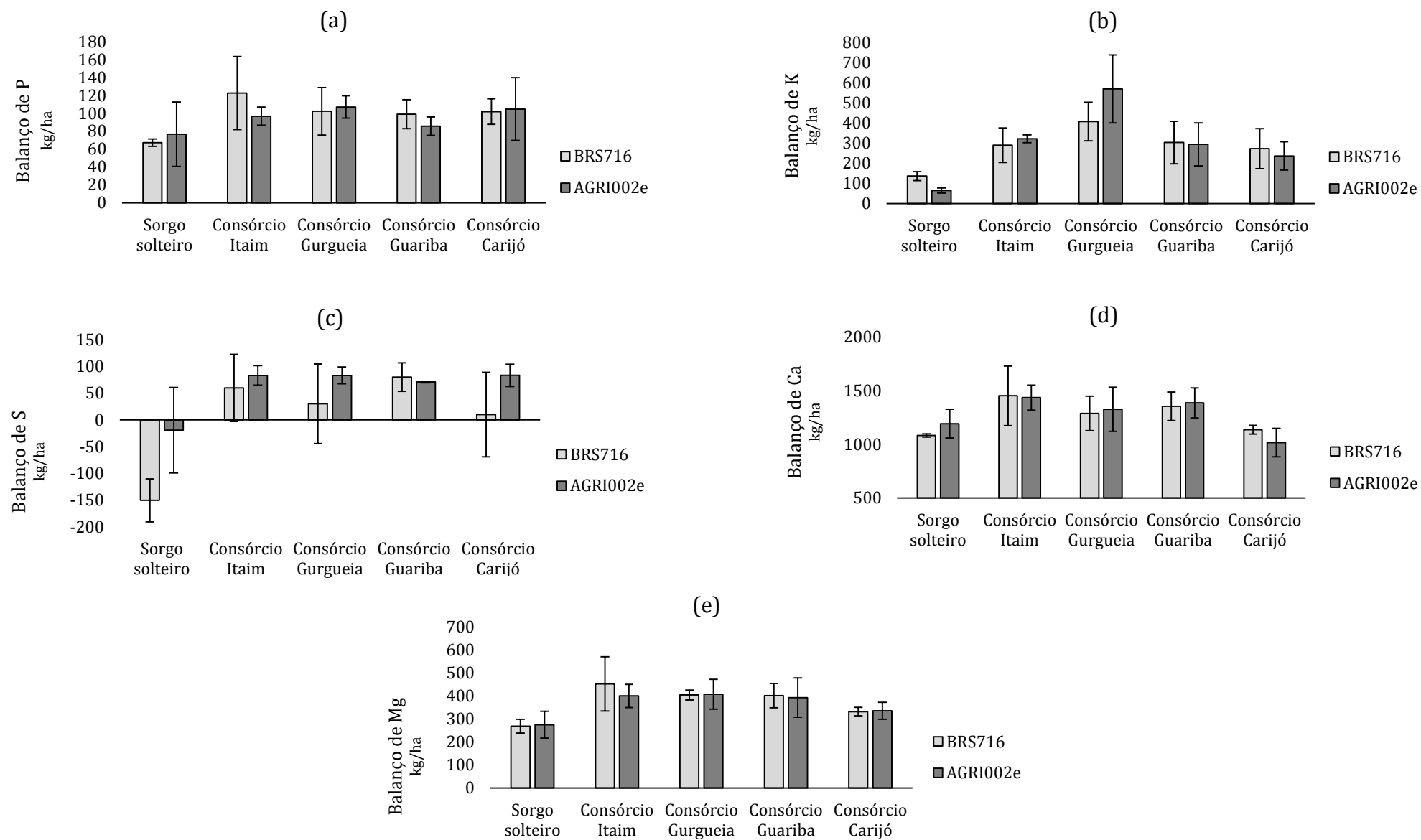


Figura 04 – Balanço de Macronutrientes no sorgo no segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022).



O balanço de cálcio se mostrou positivo tanto nos cultivos solteiros quanto nos cultivos consorciados nos dois ciclos. No primeiro ciclo, o sorgo BRS716 se destacou apresentando os melhores balanço nos dois sistemas de cultivos (Figura 03). No entanto, no segundo ciclo, o sorgo Agri002e apresentou balanços de cálcio maiores do que a cultivar BRS716, principalmente nos tratamentos solteiro e nos tratamentos consorciados com as cultivares de feijão-caupi BRS Gurgueia e BRS Guariba (Figura 04). Esse balanço positivo pode estar sendo influenciado pela adubação fosfatada realizada no início do cultivo e pelos estoques naturais desses nutrientes no solo, bem como pela adição via precipitação pluviométrica e água de irrigação. A adubação com superfosfato simples, de acordo com EL-Nagar et al., (2019) aumenta os níveis de cálcio disponível no solo, uma vez que esse fertilizante apresenta em sua composição aproximadamente 16% de cálcio. Ademais, a água de irrigação e a água proveniente das chuvas nos dois ciclos de cultivos aportaram ao solo 578 kg/ha de cálcio e isso influenciou no balanço desse nutriente.

Por sua vez, os altos teores de cálcio disponíveis nos solos do semiárido também podem contribuíram para o balanço positivo desse nutriente. Análises químicas do solo, realizadas antes do experimento, apontaram o cálcio como o macronutriente mais abundante nas áreas cultivadas. Estudos revelam que teores naturais de cálcio no solo de regiões do semiárido nordestino variam entre 3,1 cmol_c/dm³ a 5,0 cmol_c/dm³ (VITAL et al., 2015). Corroborando com esta questão, Vieira et al. (2021) analisaram 10 (dez) tipos de solos da região semiárido e inferiu, entre outras coisas, que os níveis naturais de cálcio nos solos do semiárido brasileiro foram considerados significativos.

O balanço positivo de cálcio contribui positivamente para diversos processos no sistema solo-planta, uma vez que, níveis adequados desse nutriente no solo podem auxiliar no processo de biorremediação, melhorando a aeração do solo (GNIDA; TUREK-SZYTOW, 2023), melhorar a nutrição e a fisiologia das plantas (IONESCU; IONESCU, 2014), aumentar a associação organo-mineral, levando a um maior acúmulo de carbono orgânico no solo (ROWLEY et al., 2021), aumentar a eficiência do uso de carbono, reduzir as emissões de CO₂ e melhorar as interações mineral-microbianas, promovendo, em último caso, a persistência da matéria orgânica no solo (SHABTAI et al., 2023).

O balanço de magnésio foi positivo nos dois ciclos de cultivos para todos os tratamentos realizados, com o sorgo BRS716 apresentando os maiores balanços tanto nos sistemas cultivados solteiros quanto nos sistemas cultivados em consórcio com os feijões-caupi (Figura 03). O balanço do magnésio foi o segundo maior entre os macronutrientes, ficando atrás apenas do balanço do cálcio.

O balanço positivo desse nutriente, assim como o do cálcio, pode ser explicado tanto pelos estoques encontrados no solo quanto pelas quantidades de magnésio aportadas por meio da água da chuva e de irrigação que totalizaram mais 800 kg/ha de magnésio. Outro fator que influenciou no balanço positivo de magnésio foi o uso do fertilizante sulfato de magnésio. Pesquisas concluíram que solos fertilizados com sulfato de magnésio, apresentaram níveis aumentados desse nutriente, favorecendo um maior crescimento das culturas e o melhoramento da qualidade do solo (EL-NAGAR et al., 2019; GARHWAL; JAT, 2017).

De acordo com Ferreira et al. (2023), o magnésio e o cálcio podem interagir no sistema solo-planta, afetando tanto a disponibilidade de nutrientes quanto a saúde das plantas, e isso se deve às suas vias de absorção serem semelhantes, ocasionando uma competição por locais de absorção. Portanto, os níveis de cálcio em relação aos de magnésio podem influenciar a absorção de magnésio pelas plantas e assim influenciar no balanço desse nutriente no solo.

A relação entre os balanços de cálcio e de magnésio foi de aproximadamente 2:1, isto é, duas partes de cálcio para uma parte de magnésio. Sobre isso, Menna, (2021) afirma que a proporção cálcio-magnésio afeta o equilíbrio de magnésio e como consequência impacta a absorção de nutrientes no sistema solo-planta.

O magnésio como um dos nutrientes essenciais às plantas, desempenha diversas funções no sistema solo-planta (FERREIRA et al., 2023), como a síntese da clorofila, ativação enzimática, produção de proteína na planta, isto é, tem um papel fundamental na fisiologia vegetal e nos processos bioquímicos (JIN et al., 2023).

O balanço de enxofre foi positivo para todos os tratamentos apenas no primeiro ciclo de cultivo (Figura 3). Já no segundo ciclo, os tratamentos cultivados de forma solteira apresentaram um balanço de enxofre negativo, enquanto os tratamentos cultivados de forma consorciada seguiram a tendência do ciclo anterior e se mantiveram positivos (Figura 4). Esse balanço negativo de enxofre nos cultivos solteiros pode ser explicado pelo aumento expressivo na exportação desse nutriente no segundo ciclo em relação ao primeiro, devido às altas produtividades observadas no segundo ciclo de cultivo (Anexo 7). Salienta-se que nos cálculos do balanço desse nutriente, apenas a adubação foi considerada como entrada no sistema. Ademais, o enxofre foi um dos nutrientes mais aportados ao solo pela adubação nos dois ciclos de cultivos, isto é, 128 kg/ha em cada ciclo (Tabela 3).

No primeiro ciclo, a cultivar de sorgo BRS716 cultivada em sistema solteiro, apresentou uma produtividade de matéria seca total de 15,2 Mg/ha (Anexo 7), exportando aproximadamente 23,02 kg/ha de enxofre (Tabela 8), enquanto a cultivar de sorgo Agri002e, no mesmo tipo de cultivo, produziu 27,7 Mg/ha de matéria seca total (Anexo 7), exportando o

equivalente a 64,7 kg/ha de enxofre (Tabela 8). Ou seja, o sorgo Agri002e exportou quase o triplo da cultivar BRS716 e assim proporcionando um balanço positivo. Entretanto, no segundo ciclo, em tratamento solteiro, a cultivar de sorgo BRS716 produziu um total de 52,1 Mg/ha (Anexo 7) de matéria seca total exportando o equivalente a 278 kg/ha de enxofre (Tabela 9), ou seja, aumentou em mais de 12 vezes os níveis de exportação quando comparado com o primeiro ciclo. Já a cultivar de sorgo Agri002e, também cultivado em sistema solteiro, apresentou uma produtividade total de 63,9 Mg/há (Anexo 7), exportando o equivalente a 147,5 kg/ha de enxofre no segundo ciclo (Tabela 9). Desse modo o total de nutriente aportado ao solo via fertilização não foi suficiente para atender a demanda das plantas de sorgo.

Os tratamentos cultivados em consórcio com o feijão-caupi apresentaram balanços positivos de enxofre nos dois ciclos de cultivos e isso pode ter sido influenciado tanto pelas baixas produtividade que as cultivares de sorgo apresentaram quando foram cultivados em consórcio com o feijão-caupi, quanto pelo aumento dos teores de nitrogênio no solo adicionado pela fixação biológica de nitrogênio. O incremento de nitrogênio no sistema pode influenciar a disponibilidade de enxofre no solo (LI et al., 2019). Ademais altos níveis de enxofre no solo não proporcionam um aumento na produtividade de feijão caupi (PEREIRA et al., 2021), logo a demanda por esse nutriente não aumenta e isso favorece um balanço positivo observado para os consórcios.

Estudos indicam que a fertilização sulfatada, especialmente em doses mais altas, aumenta a concentração total de enxofre no solo beneficiando as culturas de sorgo biomassa (SKWIERAWSKA, 2011). Sobre isso, Oberoi et al. (2023) analisaram como a adição de enxofre associado a um sistema de irrigação afetavam o crescimento e a qualidade das plantas de sorgo biomassa em uma região semiárida da Índia e concluíram que doses acima de 30kg/ha aumentam significativamente a altura da planta, o índice de área foliar e a quantidade de perfilhos no sorgo, isto é, aumentam a produtividade da cultura.

Em relação ao balanço de micronutrientes nos dois ciclos de cultivos, os dados são apresentados nas Figura 5 e 6. Os valores referentes ao balanço dos micronutrientes avaliados, evidenciam o ferro, zinco e manganês como os que apresentaram balanço positivo para todos os tratamentos.

É importante salientar que, durante os dois ciclos de cultivos, foram adicionados ao solo micronutrientes de uma forma direta por meio de fertilizantes sulfatados, como também, indiretamente como agregados dos fertilizantes fosfatados.

O balanço de cobre foi o que mais variou entre os dois ciclos de cultivo. No primeiro ciclo, apenas a cultivar de sorgo Agri002e cultivada em sistema solteiro e em consorciação com

a cultivar de feijão-caupi BRS Carijó, apresentou balanço positivo de cobre. Nos demais tratamentos, o balanço de cobre foi negativo, isto é, os teores de exportação superaram os níveis desse nutriente aportados ao solo. Por sua vez, no segundo ciclo, apenas o tratamento consorciado entre a cultivar de sorgo Agri002e e a cultivar de feijão-caupi BRS Itaim apresentou balanço negativo de cobre, ou seja, todos os outros tratamentos apresentaram balanço de cobre positivo.

No primeiro ciclo, o balanço negativo do cobre foi influenciado pelos baixos estoques desse micronutriente no solo (média de 0,87 kg/ha). Vale ressaltar que mesmo sendo aplicado sulfato de cobre no solo (2,0 kg/ha) e a cultura do sorgo ser uma das que acumulam pequenas quantidades de cobre em sua biomassa aérea (CAVALCANTE et al., 2018), a produtividade foi alta e isso demandou uma maior quantidade desse nutriente pelas culturas, afetando o balanço.

Por sua vez, no segundo ciclo, apesar do balanço negativo observado no ciclo anterior, os estoques iniciais de cobre no solo aumentaram mais de três vezes em relação aos estoques iniciais do ciclo anterior. Além disso foi adicionada a mesma quantidade de sulfato de cobre do primeiro ciclo (2,0 kg/ha) e isso influenciou positivamente os estoques de cobre no solo no segundo ciclo, ao ponto de nem as altas produtividades conseguir exaurir esses estoques. Portanto, os maiores níveis de cobre no solo resultaram em um balanço positivo ao final do segundo ciclo de cultivo.

A deficiência de cobre afeta negativamente o crescimento e a qualidade da biomassa do sorgo, já que ele é fundamental para fotossíntese, para o desenvolvimento reprodutivo, para metabolismo das plantas e para a defesa contra pragas e doenças (MARKOLE et al., 2020). Entretanto, o excesso de cobre também se constitui em um problema para as plantas de sorgo. Em que pese haver estudos que demonstram tolerância maior do sorgo em solos com níveis altos de cobre (LIMA et al., 2019), excessos de cobre podem reduzir a absorção de Fe, Zn, Ca, Mn nas raízes (ROY et al., 2017), podem reduzir os teores de clorofila, carotenoides, carboidratos (MISHRA et al., 2021), diminuir a taxa fotossintética (LIMA et al., 2019) e em última instância, reduzir o desempenho do crescimento da cultura (OZIEGBE et al., 2019).

O ferro, apesar de ter sido, nos dois ciclos de cultivos, o micronutriente mais exportados pelas cultivares de sorgo, apresentou balanço positivo para todos os tratamentos analisados, tanto no primeiro quanto no segundo ciclo (Figuras 5 e 6). No geral, as concentrações de ferro nos solos tropicais, inclusive os do semiárido brasileiro, são altas, principalmente nas camadas mais superficiais (VIEIRA et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2018).

No primeiro ciclo de cultivo, os balanços de ferro dos tratamentos solteiros foram levemente menores que os balanços dos tratamentos consorciados (Figura 5). Por sua vez, no segundo ciclo, os balanços desse nutriente foram consideravelmente maiores nos tratamentos consorciados quando foram comparados aos tratamentos solteiros (Figura 6).

Ao compararmos apenas os tratamentos solteiros nos dois ciclos de cultivos e, apesar de ambos apresentarem balanços positivos, verificou-se uma diminuição no balanço de ferro do segundo ciclo em relação ao primeiro ciclo, principalmente no tratamento solteiro Agri002e. Essa diferença no balanço de ferro do segundo ciclo em relação ao primeiro está relacionada às taxas de exportação desse nutriente pelas plantas e às altas produtividades que essas cultivares de sorgo biomassa apresentaram em sistemas de cultivos solteiros no segundo ciclo de produção.

A exportação desse micronutriente no primeiro ciclo pela cultivar de sorgo BRS716 foi de 2,17 kg/ha (Tabela 8) e a produtividade total apresentada foi de 15,1 Mg/ha (Anexo 7), já no segundo ciclo, a exportação de ferro pela cultivar em questão, aumentou para 5,0 kg/ha (Tabela 9) e a produtividade aumentou para 52,1 Mg/ha (Anexo 7). Por sua vez, a cultivar de sorgo Agri002e no primeiro ciclo apresentou uma exportação de 3,4 kg/ha (Tabela 8) e produziu 27,7 Mg/ha (Anexo 7) de biomassa, enquanto no segundo ciclo apresentou uma taxa de exportação de ferro igual 5,4 kg/ha (Tabela 9) e uma produtividade total de 63,8 Mg/ha (Anexo 7).

Quando consideramos apenas os sistemas consorciados entre os dois ciclos de cultivos, excetuando o tratamento consorciado entre a cultivar de sorgo BRS716 e o feijão-caupi BRS Gurgueia, que apresentou uma diminuição do balanço de ferro, percebe-se um aumento nos balanços desse micronutriente do segundo ciclo em relação aos do primeiro. Ademais, verificou-se que, no segundo, os balanços de ferro dos tratamentos consorciados com a cultivar de sorgo Agri002e aumentaram expressivamente comparados com o ciclo anterior.

Figura 05 – Balanço de Micronutrientes do sorgo no primeiro ciclo de cultivo (30/06/2021 a 27/09/2021).

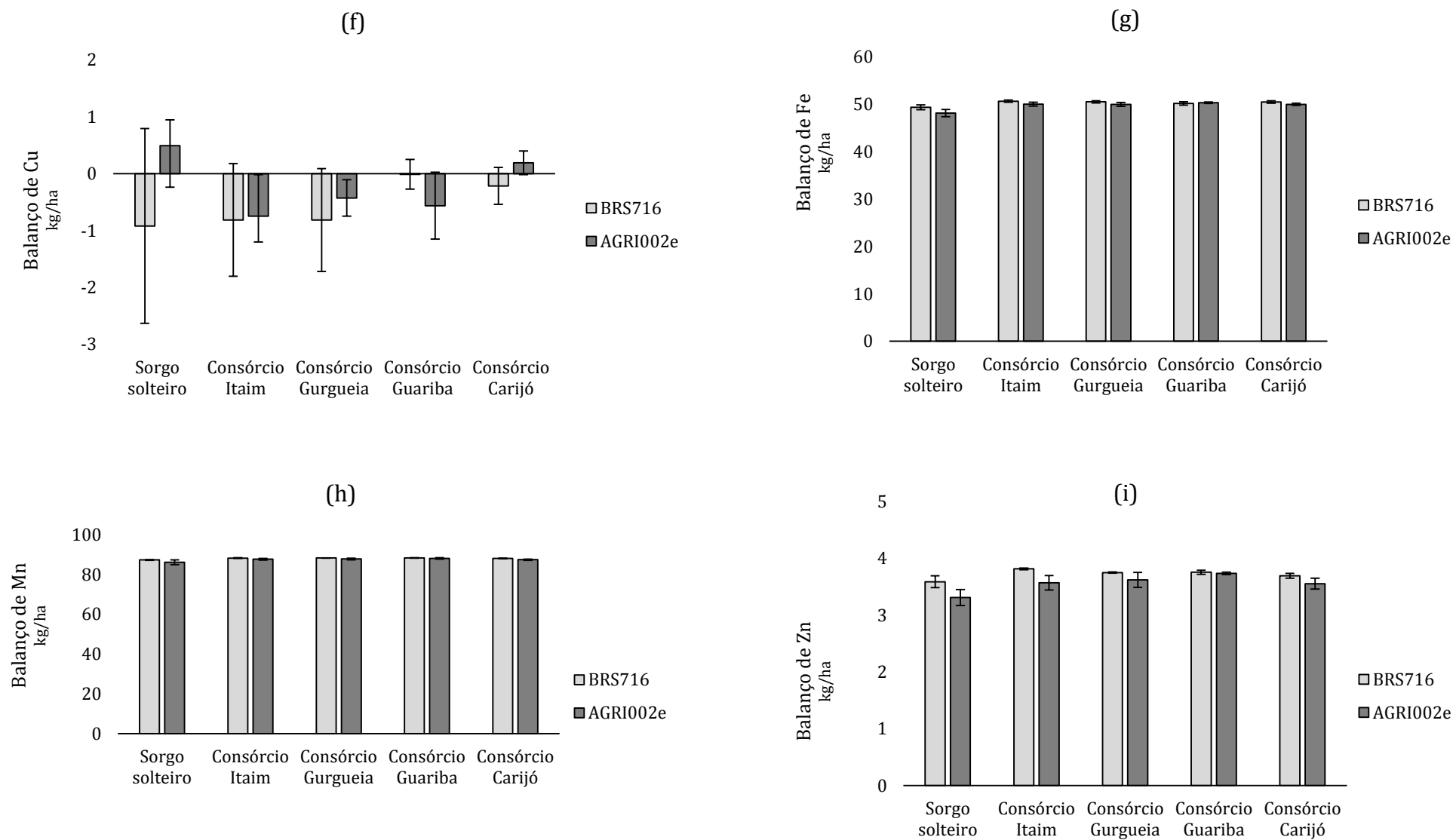
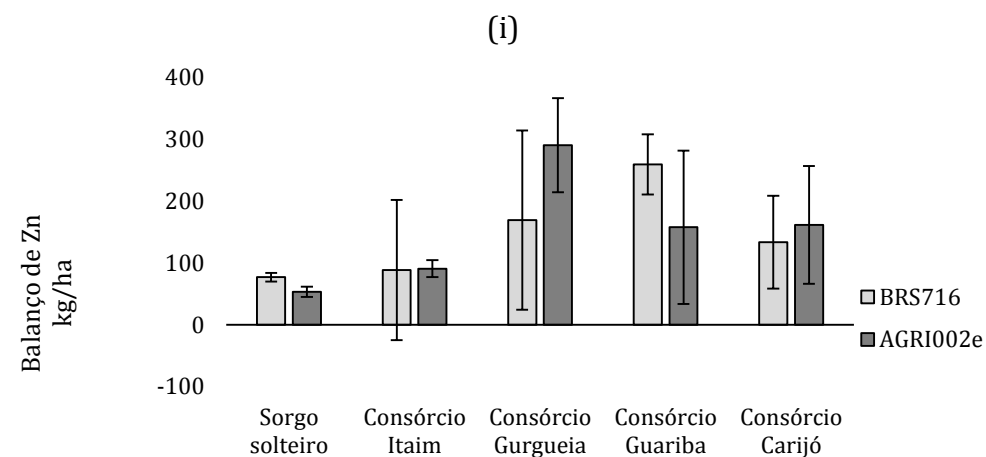
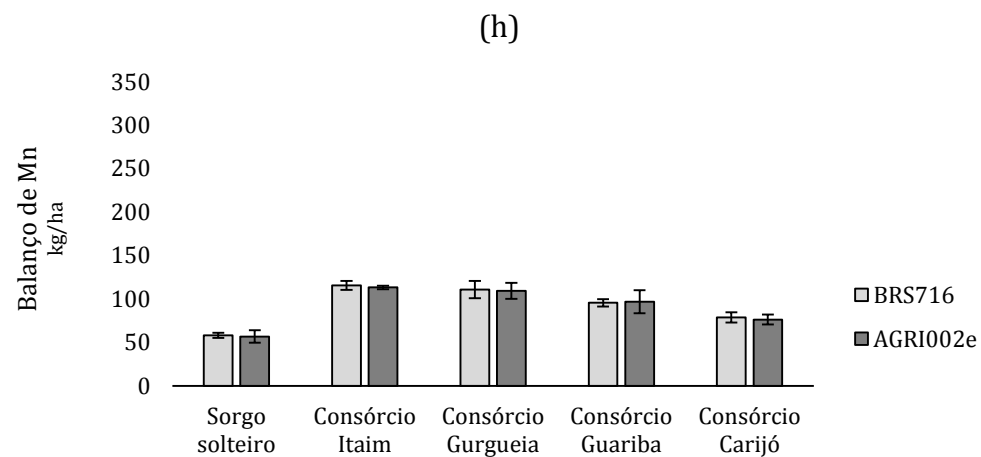
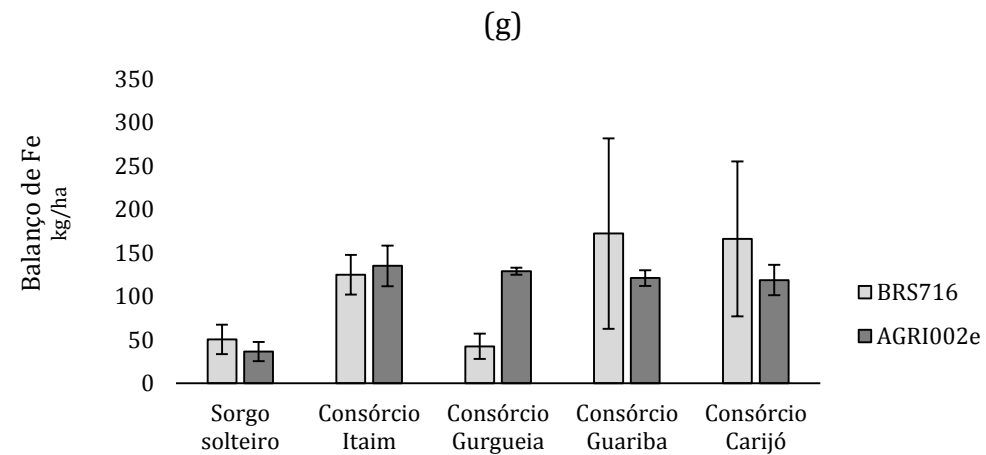
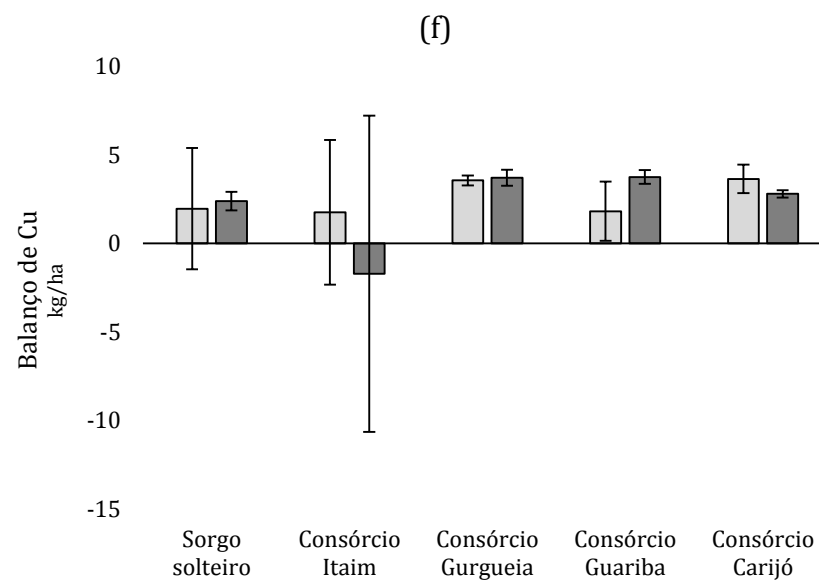


Figura 06 – Balanço de Micronutrientes no sorgo no segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022).



Os aumentos expressivos nos balanços positivos de ferro nos sistemas consorciados, principalmente no segundo ciclo podem ter sido influenciados por uma combinação de alguns fatores. Primeiramente, os estoques desse nutriente no início do segundo ciclo apresentaram teores bem maiores em relação ao primeiro ciclo, além disso, como ocorrido no ciclo anterior, houve a adubação com sulfato ferro no início do ciclo. Além disso, nesses sistemas de cultivo, há um aporte maior de nitrogênio no solo devido a fixação biológica de nitrogênio proporcionados pelos microrganismos presentes nas raízes das leguminosas. Esse aumento nos níveis de nitrogênio influencia o pH do solo que, por sua vez, pode aumentar a solubilidade e a disponibilidade de ferro (SLIMANI et al., 2022; YADAV et al., 2020). Portanto, percebe-se com isso, um aporte considerável de ferro no solo, que nem mesmo a grande demanda provocada pelas altas produtividades ocorridas no segundo ciclo, foi suficiente para diminuir o balanço de ferro nesses tratamentos.

O balanço de manganês, tanto no primeiro quanto no segundo ciclo de cultivo, foi positivo para todos os tratamentos (Figuras 5 e 6). O manganês foi o segundo micronutriente mais exportado pelas plantas de sorgo, perdendo apenas para o ferro. De acordo com Biondi et al., 2011 os teores naturais de manganês, juntamente com os teores de ferro, são os mais adequados nos solos analisados em Pernambuco. Esses valores são ratificados por Oliveira et al., (2006) que quantificaram os níveis de manganês e ferro em solos de Pernambuco utilizando diversos testes químicos e concluíram que a maioria dos solos do estado apresentam altas concentrações desses micronutrientes.

No primeiro ciclo de cultivo, os valores de balanço apresentados entre os tratamentos solteiros e os tratamentos consorciados apresentaram uma variação muito pequena, mostrando um padrão na exportação desse nutriente pelas duas cultivares de sorgo nos dois tipos de cultivos. Entretanto, no segundo ciclo, o balanço de manganês, apesar de se manter positivo, foi menor nos tratamentos solteiros quando comparados com os balanços dos tratamentos consorciados. Esse fato está relacionado com as altas produtividades ocorridas no segundo ciclo, principalmente nos cultivos solteiros.

Por sua vez, quando analisamos os tipos de cultivos nos dois ciclos de forma comparativa, observou-se que nos tratamentos solteiros, os balanços de manganês do segundo ciclo são menores em relação aos balanços dos sistemas solteiros do primeiro ciclo. Entretanto, nos tratamentos consorciados do segundo ciclo houve um aumento nos balanços de manganês, principalmente nos tratamentos consorciados entre a cultivares de sorgo BRS716 e a cultivar de feijão-caupi BRS Itaim, bem como a cultivar Agri002e e a cultivar de feijão-caupi BRS Itaim, possivelmente pela baixa demanda de manganês da cultivar de feijão-caupi Itaim.

A redução no balanço de manganês dos tratamentos solteiros do segundo ciclo em comparação com o ciclo anterior, foi influenciada pelo aumento da produtividade apresentada pelas cultivares de sorgo no segundo ciclo, comparadas com o primeiro ciclo. O aumento da produtividade da biomassa do sorgo pode levar a uma maior exportação de nutrientes do solo, inclusive manganês, pois a planta demanda uma quantidade maior de nutrientes para sustentar seu crescimento e desenvolvimento, reduzindo os níveis de nutrientes do solo ao longo do tempo (GULERIA et al., 2023).

Entretanto, o aumento do balanço de manganês nos tratamentos consorciados, pode estar associado uma produtividade menor em relação aos tratamentos solteiros. Geralmente, os sistemas consorciados, dependendo de alguns fatores, apresentam produtividade menor do que os cultivos solteiros (NELSON, 2020). Dessa forma, a taxa de crescimento das culturas influencia a absorção do manganês pelas plantas e impacta nos teores desse nutriente no solo (RASHED et al., 2019). Ademais, o feijão-caupi, no geral, gerencia os níveis de manganês com eficiência, garantindo que eles não exportem muito manganês do solo, o que contribui para manter a saúde do solo e o equilíbrio dos nutrientes (DAKORA; BELANE, 2019).

No geral, quando se observa os balanços de micronutrientes, inclusive o manganês, nos dois ciclos de cultivos, os tratamentos consorciados apresentam valores maiores em comparação com os cultivos solteiros. Esses valores correlacionam-se com os valores encontrados por Dhaliwal et al. (2022) e Chaudhary et al. (2020) que concluíram em suas pesquisas que os sistemas consorciados, entre eles, o sorgo com o feijão-caupi, melhoram o balanço de micronutrientes no solo.

O balanço de zinco foi positivo em todos os tratamentos nos dois ciclos de cultivos. Comparando ambos os ciclos de cultivos entre si, observou-se que todos os tratamentos do primeiro ciclo apresentaram balanços menores em relação aos tratamentos do segundo ciclo. Esses resultados podem estar atrelados a combinação entre os baixos estoques naturais de zinco apresentados no início do primeiro ciclo, com a exportação desse micronutriente pelas plantas de sorgo (média de 0,4 kg/ha) e um aumento nos teores no solo proporcionado pela adubação mineral com sulfato de zinco.

Diversos estudos concluem que a deficiência de zinco é comum em muitos solos e isso se deve a uma série de fatores que incluem níveis de pH do solo e baixo teor de matéria orgânica (BONINI et al., 2015; JÚNIOR et al., 2015; NETO et al., 2019). Neste sentido, faz-se necessário o aporte desse nutriente ao solo por meio da adubação mineral que, por sua vez, aumenta os estoques desse micronutriente no solo (RECENA et al., 2021; SILVA et al., 2023).

Logo, o aumento dos teores de zinco no solo associado a uma baixa exportação pelas cultivares de sorgo resultou em um balanço positivo no primeiro ciclo.

Por sua vez, no segundo ciclo, o balanço de zinco foi bem maior comparado com o ciclo anterior. Embora os teores exportados pelas cultivares de sorgo tenha aumentado significativamente neste ciclo (média de 2,06 kg/ha), impulsionados pelas altas produtividades, os estoques no solo também aumentaram muito em relação ao primeiro ciclo e isso acarretou um balanço positivo.

O aumento dos estoques de zinco no solo, no segundo ciclo, deu-se pelo somatório do saldo final do primeiro ciclo mais a adubação mineral ocorrida no início do segundo ciclo com sulfato de zinco.

Analisando cada ciclo separadamente, observou-se que no primeiro ciclo, os tratamentos não apresentaram uma diferença significativa entre os tipos de cultivos, isto é, os tratamentos solteiros e os tratamentos consorciados apresentaram um balanço muito parecidos. Esses valores podem ser explicados pela semelhança nos teores de exportações de zinco ocorrida no primeiro ciclo por todos os tratamentos, isto é, os teores de zinco exportados pelos tipos de tratamentos não variaram muito entre si. Entretanto, no segundo ciclo, os tratamentos consorciados apresentaram balanços bem acima dos tratamentos solteiros, principalmente os tratamentos consorciados sorgo Agri002e + feijão-caupi BRS Gurgueia e o sorgo BRS716 + feijão-caupi BRS Guariba.

A respeito disso, estudos demonstram que o balanço de zinco em sistemas consorciados é maior em comparação com sistemas de cultivos individuais (DRAGICEVIC et al., 2015). Especificamente nos sistemas consorciados entre o sorgo biomassa e feijão-caupi, Makoi et al. (2014) concluíram que a concentração de zinco no solo é maior quando o feijão-caupi e o sorgo biomassa é cultivado juntos em comparação quando são cultivados separadamente. Os autores atribuem esse aumento nos níveis de zinco nos sistemas consorciados à interação entre o feijão-caupi e o sorgo que afeta as propriedades do solo, incluindo o seu pH, influenciando a disponibilidade de zinco.

6 CONCLUSÃO

Considerando as condições de cultivos, o sorgo biomassa apresenta balanços de nutrientes maiores quando são cultivados em sistemas consorciados em comparação com os sistemas solteiros.

De uma forma geral, a cultivar de sorgo biomassa BRS716 apresentam os maiores balanços de nutrientes entre os sistemas de cultivos quando comparados com a cultivar de sorgo Agri002e.

REFERÊNCIAS

- ABBOUD, A.C.S. Introdução à agronomia / Antonio Carlos de Souza Abboud (organizador). – 1. ed. – Rio de Janeiro: **Interciência**, 2013. 646 p.: il.;
- ABOOD, N. M.; SALH, M. A. Response of several sorghum varieties to potassium foliar. **The Iraqi Journal of Agricultural Science**, v. 49, n. 6, p. 973, 2018.
- ADENÄUER, M.; FREZAL, C.; CHATZOPOULOS, T. Mitigating the Impact of Extreme Weather Events on Agricultural Markets Through Trade. **OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers**, No. 198. Paris: OECD Publishing, 2023.
- AFE, A. I.; NURUDEN, K.; YAMAN, U. Evaluation of growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) cultivars and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) with their competitive behavior in cowpea-sorghum intercropping. **Badeggi journal of agricultural research and environment**, v. 5, n. 1, p. 35-48, 2023.
- AKHILA, A.; ENTOORI, Keshamma. Role of earthworms in soil fertility and its impact on agriculture: A review. **Int. J. Fauna Biol. Stud**, v. 9, n. 3, p. 55-63, 2022.
- ALEJANDRO, S. et al. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. **Frontiers in plant science**, v. 11, p. 300, 2020.
- ALFIERI, F.; LÓPEZ-PADILLA, A.; JULIO-GONZALEZ, L. C. **Politics, Economics and Demographics of Food Sustainability and Security**. Reference Module in Food Science, 2023.
- ALMENDROS, P. et al. Influence of Moisture Conditions on Residual Zn Concentrations Applied as Synthetic Chelates. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 46, n. 5, p. 588-604, 2015.
- ALPINO, T. M. A. et al. The impacts of climate change on Food and Nutritional Security: a literature review. **Ciencia & saude coletiva**, v. 27, p. 273-286, 2022.
- ALVES, H. K. M. N. et al. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 1, 2022.
- AMORIM, P. B. O IPCC, **Modelos de clima e cenários** PPGEcologia - UFSC. Youtube, 28 de Set. de 2020. Disponível em: 1.2. O IPCC, Modelos de Clima e Cenários | PPGEcologia – UFSC - YouTube. Acesso em: 22 de Ago. 2022.
- ANGELOTTI, F.; GIONGO, V. Ações de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas. In: MELO, R. F. de; VOLTOLINI, T. V. (Ed.). Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido. Brasília, DF, **Embrapa**, 2019. cap. 13, p. 445-467
- ANGELOTTI, F.; SIGNOR, D.; GIONGO, V. Mudanças climáticas no Semiárido brasileiro: experiências e oportunidades para o desenvolvimento. **Embrapa Semiárido**-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2015.

ANGULO-BEJARANO, P. I.; PUENTE-RIVERA, J.; CRUZ-ORTEGA, R. Metal and Metalloid Toxicity in Plants: An Overview on Molecular Aspects. **Plants**, [S.l.], v. 10, n. 4, p. 635, 2021.

ANTUNES, G. R. et al. Associative diazotrophic bacteria from forage grasses in the Brazilian semi-arid region are effective plant growth promoters. **Crop and Pasture Science**, v. 70, n. 10, p. 899-907, 2019.

ARAYA, M. A. et al. Evaluación de fertilizantes líquidos con silicio, calcio o magnesio sobre el crecimiento del sorgo em invernadero. **Agronomía Costarricense**, v. 39, n. 2, p. 47-60, 2015.

ARBAČAUSKAS, Jonas et al. The Influence of Mineral NPK Fertiliser Rates on Potassium Dynamics in Soil: Data from a Long-Term Agricultural Plant Fertilisation Experiment. **Plants**, v. 12, n. 21, p. 3700, 2023.

ASSUNÇÃO, Ricardo. Impact of climate change on food systems—the One Health approach. **European Journal of Public Health**, v. 32, n. Supplement_3, p. ckac129. 019, 2022.

BADAMASI, H.; DAGARI, M. S. Responses of Hydroponically Grown Sorghum (*Sorghum bicolor* LM) to Zinc (Zn) Stress. **Journal Of Sciences Research**, v. 4, n. 3, p. 111-120, 2019.

BAHADUR, I. et al. Towards the soil sustainability and potassium-solubilizing microorganisms. In: Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture. Berlin/Heidelberg, Germany: **Springer**, 2016. p. 255–266.

BANG, T. C. et al. The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2446-2469, 2021.

BARROW, N. J.; HARTEMINK, A. E. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. **Plant and Soil**, v. 487, n. 1, p. 21-37, 2023.

BARUAH, R. Towards the bioavailability of zinc in agricultural soils. Role of Rhizospheric **Microbes in Soil**: Volume 2: Nutrient Management and Crop Improvement, p. 99-136, 2018.

BASHIR, O. et al. Soil organic matter and its impact on soil properties and nutrient status. **Microbiota and Biofertilizers**, Vol 2: Ecofriendly Tools for Reclamation of Degraded Soil Environs, p. 129-159, 2021.

BATISTA, K.; VILELA, L. A. F. Tropical Grasses—Annual Crop Intercropping and Adequate Nitrogen Supply Increases Soil Microbial Carbon and Nitrogen. **Agronomy**, v. 13, n. 5, p. 1275, 2023.

BATISTA, M.A. et al. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., GOTO, R., comps. Hortaliças-fruto [online]. Maringá: **EDUEM**, 2018, pp. 113-162.

BATISTA, V. et al. Agronomic and energetic potential of sorghum evaluated in two consecutive crops. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 22, n. 6, p. 1-9, 2018.

BEHNASSI, M. et al. Enhancing resilience for food and nutrition security within a changing climate. Emerging Challenges to Food Production and Security in Asia, Middle East, and Africa: **Climate Risks and Resource Scarcity**, p. 1-42, 2021.

BENAZZI, E. S.; LEITE, L.F.C. **Solo e o complexo desafio da segurança alimentar**. In: Solos sustentáveis para agricultura no Nordeste. Embrapa, 2021, pp. 497-498

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. As plantas e o clima: princípios e aplicações - Guaíba - RS. **Agrolivros**, 2017. 352 p. : il.

BEZERRA, A. C. et al. Annual rainfall in Pernambuco, Brazil: regionalities, regimes, and time trends. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 403-414, 2021.

BEZERRA, R. V. **Fixação e transferência de nitrogênio em cultivos consorciados de sorgo e leguminosas**. 2022. 83 f.: il. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade federal de Pernambuco, Recife, 2022.

BHAGAT, N. et al. Background level, occurrence, speciation, bioavailability, uptake detoxification mechanisms and management of Mn-polluted soil. In: Appraisal of Metal (loids) in the Ecosystem. Elsevier, 2022. p. 61-80.

BHARGAVA, A. et al. **Human civilization and agriculture. Participatory plant breeding: Concept and applications**, p. 1-27, 2019.

BHATTACHARYYA, P. et al. **Impact of climate change on agriculture: Evidence and predictions**. Climate Smart Agriculture: Concepts, Challenges, and Opportunities, p. 17-32, 2020.

BHATTACHARYYA, S. S. et al. Nutrient budgeting—a robust indicator of soil–water–air contamination monitoring and prevention. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, 2021.

BIONDI, C. M. et al. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Co em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1057-1066, 2011.

BOAHEN, S. et al. Understanding Resilience of Agricultural Systems: A Systematic Literature Review. **Proceedings of the Design Society**, v. 3, p. 3701-3710, 2023.

BONEWITZ, R. Rochas e minerais. 2ª ed. Londres: DK Publishing, 2012.

BONINI, Carolina dos Santos Batista et al. Micronutrient contents of a revegetated saprolite exposed by excavation of an oxisol. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 46, n. sup1, p. 283-295, 2015.

BORMA, L.; GITIRANA Jr., G.; LUIZ, G. Interação solo-planta-atmosfera e o papel dos solos não saturados. In: CARVALHO, I. J.; JUNIOR, G. d.; MACHADO, S. L.;

MASCARENHA, M. M.; F. C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: **ABMS**, 2015. p. 327-360.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

BRASIL, E.C., CRAVO, M.D.S. & VELOSO, A.C. **Amostragem do solo**, in E.C. Brasil, M.D.S. Cravo & I.J.M. Viegas (eds), *Recomendações de adubação e calagem para o Estado Pará*, Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Pará, 2020, pp. 47-54

BRITO, LT de L. et al. Avaliação das características físico-química e bacteriológicas das águas de cisternas da comunidade de Atalho, Petrolina-PE. In: Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, 5., 2005, Teresina, PI. **Anais...Teresina: ABCMAC**; Governo do Estado do Piauí; Embrapa Semi-Árido; IRPAA;ASA, 2005. 1 CD-ROM., 2005.

BRITO, M. T. L. A. **Avaliação espacial de atributos químicos do solo no semiárido**. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Campina Grande, Patos, 2010. 42 p.

BRITO, R. F. de et al. Morfologia e fertilidade do solo em áreas de produção do semiárido. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 525-532, 2017.

BRUNEAU, M. et al. Plants and redox potential: iron-rich clay minerals as redox active compounds in soils. **Soil Research**, v. 61, n. 3, p. 241-254, 2022.

CANUTO, J. C. **Agroflorestas e resiliência social**. In: MAGNONI JÚNIOR, L.; STEVENS, D.; LOPES, E. S. S.; CAVARSAN, E. A.; VALE, J. M. F; MAGNONI, M. G. M.; TEIXEIRA, T.; FIGUEIREDO, W. S. (Org.). *Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano*. São Paulo: Centro Paula Souza, 2017. P. 157-168.

CARVALHO, H. R. L. de; SILVA, G. G. H. Natural and anthropic inputs of nutrients in hydrographic basins of reservoirs in the Brazilian semiarid. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 34, p. e27, 2022.

CARVALHO, R. M. de et al. Determination of metals in Brazilian soils by inductively coupled plasma mass spectrometry. **Environmental monitoring and assessment**, v. 187, p. 1-9, 2015.

CASTRO, F. M. R. et al. Accumulation of biomass and lignocellulosic compounds in photoperiod-sensitive biomass sorghum genotypes. **Biomass and Bioenergy**, v. 158, p. 106344, 2022.

CASTRO, F. M. R. et al. Agronomic and Energetic Potential of Biomass Sorghum Genotypes. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 1862-1873, 2015.

CAVALCANTE, T. J. et al. Macro and micronutrients uptake in biomass sorghum. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, p. 364-373, 2018.

CAVALCANTI, F. J. A. Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco. Recife: **IPA**, 2008, 212 p.

CENCI, D. R.; LORENZO, C. A. A mudança climática e o impacto na produção de alimentos: alguns elementos de análise da realidade brasileira e argentina; Unijuí; **Direito Em Debate**; 29; 54; 11-2020; 32-43.

CHARI, N. R. et al. Interactive effects of temperature and redox on soil carbon and iron cycling. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 157, p. 108235, 2021.

CHAUDHARY, R. et al. Effect of intercropping on growth, yield and profitability of sorghum, pearl millet and cowpea. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 9, n. 5S, p. 179-182, 2020.

CHOUDHARY, S. K.; JAT, M. K.; MATHUR, A. K. Effect of micronutrient on yield and nutrient uptake in sorghum. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 6, n. 2, p. 105-108, 2017.

COONAN, E. C. et al. Microorganisms and nutrient stoichiometry as mediators of soil organic matter dynamics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, n. 3, p. 273-298, 2020.

CORREIA, H. E. et al. Effect of Climate Change on Agricultural Production. In: Impacts of Climate Change and Economic and Health Crises on the Agriculture and Food Sectors. **IGI Global**, 2022. p. 99-114.

COSTA, A. F. S.; COSTA, A. N. Valores orientadores de qualidade de solos no Espírito Santo. Vitória – ES: **Incaper**, 2015. 152p.

COSTA, R. M. C. et al. Fertirrigation with manganese in beet. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 47, p. 1-8, 2023.

DAKORA, F. D.; BELANE, A. K. Evaluation of protein and micronutrient levels in edible cowpea (*Vigna Unguiculata* L. Walp.) leaves and seeds. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 3, p. 70, 2019.

DARNHOFER, I. Farming resilience: From maintaining states towards shaping transformative change processes. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3387, 2021.

DAS, S. K.; AVASTHE, R. K.; YADAV, A. Secondary and micronutrients: deficiency symptoms and management in organic farming. **Innov Farm**, v. 2, n. 4, p. 209-211, 2017.

DENISOV, S.; ELISEEV, A.; MOKHOV, I. Model estimates for climatic effects of anthropogenic GHG emission scenarios in the 21st century. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **IOP Publishing**, 2022. p. 012014.

DEUSDARÁ, K. R. L. et al. Rainwater chemistry and bulk atmospheric deposition in a tropical semiarid ecosystem: the Brazilian Caatinga. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 74, p. 71-85, 2017.

DHALIWAL, S. S. et al. Improving soil micronutrient availability under organic farming. In: *Advances in organic farming*. **Woodhead Publishing**, 2021. p. 93-114.

DHALIWAL, S. S. et al. Interactive effects of molybdenum, zinc and iron on the grain yield, quality, and nodulation of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in North-Western India. **Molecules**, v. 27, n. 11, p. 3622, 2022.

DICK, Grasielle et al. Quantificação da biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus dun nii* Maiden estabelecido no Bioma Pampa. **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2016.

DÖBEREINER, J. **Avanços recentes na pesquisa em fixação biológica de nitrogênio no Brasil**. Estudos Avançados, [S. l.], v. 4, n. 8, p. 144-152, 1990. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/8549>. Acesso em: 23 abr. 2023.

DORAU, K.; PAPENFUß, S.; MANSFELDT, T. Temperature-dependent oxide removal from manganese-and iron oxide-coated soil redox bars. **Journal of soils and sediments**, v. 18, p. 680-687, 2018.

DRAGICEVIC, V. et al. Effect of the maize–soybean intercropping system on the potential bioavailability of magnesium, iron and zinc. **Crop and Pasture Science**, v. 66, n. 11, p. 1118-1127, 2015.

DUGASSA, M. Intercropping as a multiple advantage cropping system. **International journal of research in agronomy**, Vol. 6, Iss: 1, pp 44-50, 2022.

EDIVAN, R. L. Sistemas conservacionistas de recuperação de pastagens degradadas, 1ª Ed. – Curitiba: **Appris**, 2018.

ELLISON, J. C. Mangrove ecosystem-based adaptation: Advice on improved success. **CHEC Hum Ecol**, v. 30, p. 37-40, 2020.

EL-NAGAR, E. I. et al. The role of magnesium in phosphorus avialability in soil. **Zagazig Journal of Agricultural Research**, v. 46, n. 5, p. 1467-1478, 2019.

EL GAYAR, Attia. A study on plant nutrition balance, soil fertility and economic returns of investments. **International Journal of Agricultural Invention**, v. 5, n. 1, p. 31-39, 2020.

ESUBALEW, T.; AMARE, A.; MOLLA, E. Quantificação do balanço de nutrientes do solo e estoque em propriedades familiares na bacia hidrográfica de Agew Mariam, no norte da Etiópia. **Heliyon**, v. 9, n. 4, 2023.

FALCON, W. P.; NAYLOR, R. L.; SHANKAR, N. D. Rethinking global food demand for 2050. **Population and Development Review**, v. 48, n. 4, p. 921-957, 2022.

FERNÁNDEZ, V.; GIL- PELEGRÍN, E.; EICHERT, T. Foliar water and solute absorption: an update. **The Plant Journal**, v. 105, n. 4, p. 870-883, 2021.

FERREIRA, L. S. et al. The Nutrient Magnesium in Soil and Plant: A Review. **Int. J. Plant Soil Sci**, v. 35, n. 8, p. 136-144, 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). International Fund for Agricultural Development (IFAD). The United Nations Children's Fund (UNICEF). World Food Programme (WFP). World Health Organization (WHO). **The state of food security and nutrition in the world 2018**. Building climate resilience for food security and nutrition. Roma: FAO; 2018.

FULFORD, A. M.; WANG, Z.; ZAVALLONI, C. Nitrogen mineralization following fall-applied compost to subsurface drip- irrigated processing tomatoes in California. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 6, n. 2, p. e20385, 2023.

GABRIEL, L.F. et al. Mudança climática e seus efeitos na cultura da mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online]. 2014, v. 18, n. 1, pp. 90-98. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100012>>. Epub 28 Jan 2014. Acessado em 28 Set. de 2023.

GALEANO, E.S.J. **Consórcio entre gramíneas e leguminosas produção de silagens, fenos e pré-secados**. 2021. 89 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2021.

GARHWAL, R. S.; JAT, J. R. Effect of magnesium sources on dry matter yield and plant nutrients content of wheat (*Triticum aestivum* L.), barley (*Hordeum vulgare* L.) and maize (*Zea mays* L.) crops varieties. **An Asian Journal of Soil Science**. Vol. 12, Iss: 1, pp 210-216. 2017.

GAVA, C. A. T. et al. Land- use change alters the stocks of carbon, nitrogen, and phosphorus in a Haplic Cambisol in the Brazilian semi- arid region. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 1, p. 953-963, 2022.

GENG, Y. et al. Phosphorus biogeochemistry regulated by carbonates in soil. **Environmental Research**, v. 214, p. 113894, 2022.

GIESECKE, Annette (Ed.). A cultural history of plants in antiquity. **Bloomsbury Publishing**, 2023.

GNIDA, A.; TUREK-SZYTOW, J. Calcium preparation aided bioremediation of fluoranthene-contaminated soil. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 234, n. 1, p. 17, 2023.

GONÇALVES, C. W. P. **O desafio ambiental** – 3ª ed. – Rio de Janeiro: Record, 2012.

GULERIA, G. et al. Biofortification of Sorghum (*Sorghum bicolor*). In: Biofortification in Cereals: Progress and Prospects. **Singapore: Springer Nature Singapore**, 2023. p. 259-284.

GUYOT, M. S. D. **Agroecologia E Convivência Com O Semiárido: Elemento Para A Resiliência Às Mudanças Climáticas No Sertão Da Bahia** – Tese De Doutorado - Versão Revisada De Acordo Com A Resolução Copgr6018 De 2011. Piracicaba, 2018.

GUYOT, M. S. D.; FALEIROS, K. S.; GANDARA, F. B. **Agroecologia e resiliência às mudanças climáticas na agricultura familiar: Estudo de caso no Semiárido da Bahia**. Piracicaba, SP. Nov./2015.134p.

GRYGORENKO, Zlata; NAYDONOVA, Ganna. The concept of “resilience”: history of formation and approaches to definition. **Public administration and law review**, n. 2, p. 76-88, 2023.

HART, R. D. **agrossistemas: conceitos básicos**. Turrialba, C.R., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 1979. 211 p.

HE, Y. Birth of Traditional Agriculture: Selection of Man and Nature. In: The Agricultural Civilization of Ancient China. **Singapore: Springer Nature Singapore**, 2023. p. 7-17.

HOLANDA, A. C. et al. Aporte de Serapilheira e Nutrientes em uma Área de Catinga. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 621-633, 2017.

HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, p. 1-23, 1973.

HOSSAIN, S. M.; ATIBUDHI, H.; MISHRA, S. Agricultural Vulnerability to Climate Change: A Critical Review of Evolving Assessment Approaches. **Technical Advisory Board**, p. 141, 2023.

HUNDAL, H. S.; SINGH, K.; SINGH, D. Geochemistry of manganese in neutral to alkaline soils of Punjab, Northwest India and its availability to wheat and rice plants. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 50, n. 5, p. 627-638, 2019.

HUSSAIN, A. et al. Integrating the potential of *Bacillus* sp. Az6 and organic waste for zinc oxide bio-activation to improve growth, yield and zinc content of maize grains. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 57, n. 1, 2020.

ILIĆ, I.; JOVANOVIĆ, S.; PETROVIĆ-RANDELOVIĆ, M. Relationship Between Climate Change and Agriculture at the EU Level. **Economic Themes**, v. 60, n. 3, p. 323-342, 2022.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA). **O semiárido brasileiro**. Disponível em: www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro. Acesso em 10 de Maio de 2023.

IONESCU, N.; IONESCU, S. G. Relationships between sludge doses and calcium content from agricultural crops. **Annals of the University of Craiova-Agriculture, Montanology, Cadastre Series**, v. 44, n. 1, p. 121-126, 2014.

IPCC, 2022: **Resumo para os Formuladores de Políticas** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. Em: Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Na imprensa. Mudanças Climáticas 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade.

IPCC, 2022: **Resumo para os Formuladores de Políticas**. In: Mudanças Climáticas 2021: A Base da Ciência Física. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, e B. Zhou (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, EUA, pp. 3-32

IPCC, 2022: **Resumo para os Formuladores de Políticas**. In: Mudanças Climáticas 2022: Mitigação das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, EUA.

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp1.

ISINKARALAR, K; ERDEM, R. The State of Potassium Accumulation in Several Tree Species. **Environmental research & technology**, v. 5, n. 1, p. 94-100, 30 jan. 2022.

JANARDHAN, S. et al. Effect of Zinc and Iron Fertilization on Growth and Yield of Direct Sown Rice. **Extended Summaries**, p. 541, 2020.

JATANA, B. S. et al. Regulating the nutrient release rates from proteinaceous agricultural byproducts using organic amendments and its effect on soil chemical and microbiological properties. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 6, p. 747-758, 2020.

JIN, X. et al. Magnesium nutrient application induces metabolomics and physiological responses in mulberry (*Morus alba*) plants. **International journal of molecular sciences**, v. 24, n. 11, p. 9650, 2023.

JÚNIOR, A. C. G. et al. Fitodisponibilidade de metais e produção de tifton 85 cultivada com diferentes fontes e doses de zinco. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 14, n. 1, p. 33-38, 2015.

KCHAOU, R. et al. Forage potential of cereal–legume mixtures as an adaptive climate change strategy under low input systems. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 338, 2022.

KEUTGEN, A. J. Climate change: challenges and limitations in agriculture. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **IOP Publishing**, 2023. p. 012069.

KHAN, Z. I. et al. Evaluating pasture and soil allowance of manganese for Kajli rams grazing in semi-arid environment. **Tropical Animal Health and Production**, v.47, p. 563- 566, 2015.

KLAUSMEIER, C. A. et al. Ecological limits to evolutionary rescue. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 375, n. 1814, p. 20190453, 2020.

KOLAWOLE, E., OKONKWO, W.I. Impacts of climate change on environment and the remedies. **International Journal of Weather, Climate Change and Conservation Research**, v. 8, n. 2, p. 1-9, 2022.

KORBLI, M. Y.; ACHEAMPONG, A. A. Spatial dimensions of food and nutrition security in the Northern region of Ghana. **South African Journal of Geomatics**, v. 9, n. 2, p. 415-432, 2020.

KORITSCHONER, Julius J. et al. Spatial patterns of nutrients balance of major crops in Argentina. **Science of The Total Environment**, v. 858, p. 159863, 2023.

KOTHIYAL, S.; SANDHU, S. S.; KAUR, J. Modelling the climate change impact of mitigation (RCP 2.6) and high emission (RCP 8.5) scenarios on maize yield and possible adaptation measures in different agroclimatic zones of Punjab, India. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 103, n. 14, p. 6984-6994, 2023.

KULKARNI, S.; GOSWAMI, A. **Effect of excess fertilizers and nutrients: a review on impact on plants and human population**. In: Proceedings of International Conference on Sustainable Computing in Science, Technology and Management (SUSCOM), Amity University Rajasthan, Jaipur-India. 2019.

KUMAR, A. S. et al. Functional and biotechnological cues of potassium homeostasis for stress tolerance and plant development. **Biotechnology and Genetic Engineering Reviews**, v. 5, p. 1–44, 2022.

KUMAR, Arvind. Ecosystem-based adaptation: approaches to sustainable management of aquatic resources. **Elsevier**, 2022.

KUZIEMSKA, B.; WYSOKIŃSKI, A.; TRĘBICKA, J. The effect of different copper doses and organic fertilisation on soil's enzymatic activity. **Plant Soil Environment**, v. 66, p. 93–98, 2020.

KWEKU, D. W. et al. Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming. **Journal of Scientific research and reports**, v. 17, n. 6, p. 1-9, 2018.

LALYER, C. R.; VON GLEICH, A.; GIESE, B. **Vulnerability Analysis of Ecological Systems**. In: VON GLEICH, A.; SCHRÖDER, W. (Eds.). *Gene Drives at Tipping Points*. Springer, 2020. p. 57-77.

LAMBERS, H. et al. Leaf manganese concentrations as a tool to assess belowground plant functioning in phosphorus-impooverished environments. **Plant and soil**, v. 461, p. 43-61, 2021.

LAWRENCE, D. J. et al. Divergent, plausible, and relevant climate futures for near-and long-term resource planning. **Climatic Change**, v. 167, n. 3, p. 38, 2021.

LEÃO, D. A. S.; FREIRE, A. L. de O.; MIRANDA, J. R. P. de. Estado nutricional de sorgo cultivado sob estresse hídrico e adubação fosfatada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 74-79, 2011.

LEUTHER, Frederic. **Soil structure-a dynamic soil property which effects multiple soil functions**. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2023. p. EGU-15721.

LI, T. et al. Frequency and intensity of nitrogen addition alter soil inorganic sulfur fractions, but the effects vary with mowing management in a temperate steppe. **Biogeosciences**, v. 16, n. 14, p. 2891-2904, 2019.

LI, Z. et al. Changes in soil properties and the phoD-harboring bacteria of the alfalfa field in response to phosphite treatment. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 1013896, 2022.

LIAQAT, Waqas et al. Climate change in relation to agriculture: A review. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 20, n. 2, 2022.

LIMA, J. S. et al. Concentration of Metals in Plant Litter Produced in Regions of Caatinga in Southwest Bahia, Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 31, p. 1445-1452, 2020.

LIMA, L. R. et al. Characterization of biomass sorghum for copper phytoremediation: photosynthetic response and possibility as a bioenergy feedstock from contaminated land. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 25, n. 2, p. 433-441, 2019.

LIN, B. B. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. **BioScience**, v. 61, n. 3, p. 183-193, 2011.

LINDER, H. Peter et al. Global grass (Poaceae) success underpinned by traits facilitating colonization, persistence and habitat transformation. **Biological Reviews**, v. 93, n. 2, p. 1125-1144, 2018.

LOPES, A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2a ed., rev, e ampl. - - Piracicaba, POTAFOS, 1988. 177p.

LOPES, Breno. et al. Médias climáticas para os últimos ciclos nodais lunares e períodos de manchas solares: Avaliações em cidades pernambucanas. **Nucleus**, v. 17, n. 2, p. 279-288, 2020.

MA, Longshuai. **A strategy to deal with climate change: Intercropping system has attracted increasing interest**. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2023. p. EGU-14554.

MACEDO, R. S. et al. Effects of degradation on soil attributes under Caatinga in the Brazilian semi-arid. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4702, 2023.

MACHEKA, L. et al. Linking Climate Change Adaptation Strategies and Nutrition Outcomes: A Conceptual Framework. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 43, n. 2, p. 201-212, 2022.

MAJHI, A.; THULASEEDHARAN DHANYA, C.; CHAKMA, S. Quantification of model uncertainty in the projection of sub-daily maximum wet spell length under RCP 8.5 climate change scenario. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2022. p. EGU22-54.

MAKOI, J.H.J.R; CHIMPHANGO, S.B.M; DAKORA, F.D. Changes in rhizosphere concentration of mineral elements as affected by differences in root uptake and plant growth of five cowpea genotypes grown in mixed culture and at different densities with sorghum. **American Journal of Experimental Agriculture**. pp. 193-214. 2014.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: **POTAFOS**. 1997.

MARKOLE, S. K. et al. Agronomic biofortification and nutrient uptake of sorghum (*Sorghum biochor* L.) as influenced by fertilization strategies. **International Journal of Chemical Studies**, v. 8, p. 2107-2110, 2020.

MARSCHNER, P.; RENGEL, Z. Nutrient availability in soils. In: Marschner's Mineral Nutrition of Plants. **Academic Press**, 2023. p. 499-522.

MARTINEZ, H. E. P.; MAROTTA, J. J. L.; MANGAS, I. B. Relações solo-planta: Bases para a nutrição e produção vegetal. 1. ed. Viçosa, MG: **Editora UFV**, 2021.

MARTINS, A. G. et. al. Manejo do solo em sistemas integrados de produção. Ponta Grossa – PR: **Atena**, 2022.

MATOS, A.; DOS ANJOS, D. Seleção de híbridos de sorgo biomassa no município de Confresa-MT. **PesquisAgro**, v. 5, n. 1, p. 14-24, 2022.

MAY, A. et al. Use of biomass sorghum for the bioremediation of heavy metal-contaminated environments. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e95996770, 2020.

MBOW, C. et al. **Food Security**. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva, in press, 2019.

MEDEIROS, J. C. et al. **Manejo e conservação do solo e da água em sistemas agrícolas no bioma cerrado do nordeste brasileiro**. IN: Solos sustentáveis para agricultura no Nordeste. Embrapa (2021), p. 173.

MEHERA, B. et al. Effect of Micronutrients on Growth and Yield of Sorghum (*Sorghum bicolor* L.). **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 13, n. 7, p. 259-263, 2023.

MENDES, Walter da C. et al. Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 972-977, 2016.

MENNA, A. Nutrients balance approach with emphasis on base cations and ratios concepts as a decisions-support tool in optimizing fertilizers use. **African Journal of Agricultural Research**, v. 17, n. 4, p. 629-641, 2021.

MILLER, G. T.; SPOOLMAN, S. E. **Ecologia e Sustentabilidade**. Cengage Learnin, São Paulo, 2012.

MISAL, N. B.; SINGH, N. Role of Different Forms of Potassium in Plant Metabolism. In: Current Topics in Agricultural Sciences, Vol. 8. **B P International**, 2022. p. 23-28.

MISHRA, D.; KUMAR, S.; MISHRA, B. N. An overview of morpho-physiological, biochemical, and molecular responses of sorghum towards heavy metal stress. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology** Volume 256, p. 155-177, 2021.

MOORE, V. M. et al. Toward plant breeding for multicrop systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 120, n. 14, p. e2205792119, 2023.

MOSSA, Abdul-Wahab et al. The effect of soil properties on zinc lability and solubility in soils of Ethiopia—an isotopic dilution study. **Soil**, v. 7, p. 255-268, 2021.

MUNIR, M. et al. Assessment of Available Manganese in Milk by Using fodders Grown in Long-Term Wastewater Irrigated Soil. **Journal of Bioresource Management**, v. 8, n. 2, p. 11, 2021.

MUSTAFAYEV, Z. Soil fertilizer as an antropogenic factor of the increase potential in biological fixation of nitrogen. **Bulletin of Science and Practice**, 2019.

MCCALLUM, Erin. Temperature spikes snuff out Earth's biodiversity. **Journal of Experimental Biology**, v. 223, n. 9, p. jeb214270, 2020.

NAEEM, M.; ANSARI, A. A.; GILL, S. S. (Ed.). Essential plant nutrients: uptake, use efficiency, and management. **Cham: Springer International Publishing**, 2017.

NAIK, S. K.; DAS, D. K. Changes in Zinc Concentration as Influenced by Sesquioxide Under Different Moisture Regimes in Acidic Rice Soils of Eastern India. **National Academy Science Letters**, v. 43, n. 1, p. 1-4, 2020.

NASAR, J. et al. Intercropping induce changes in above and below ground plant compartments in mixed cropping system. **Biomed. J. Sci. Tech. Res**, v. 17, n. 5, p. 13043-13050, 2019.

NASCIMENTO, L. A. **Modelo de consórcio com eficácia energética e alimentar para o polo gesseiro do Araripe**. 2023. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade de Pernambuco, campus Petrolina, Petrolina-PE, 2023.

NAZ, F. **Plant nutrition, transport, mechanism and sensing in plants**. In Sustainable Plant Nutrition; Aftab, T., Hakeem, K.R., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2023; pp. 209–228.

- NAZARENKO, L. S. et al. Future climate change under SSP emission scenarios with GISS-E2. 1. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 14, n. 7, p. e2021MS002871, 2022.
- NAZARI, L.; ROPELEWSKA, E.; ZADEH, M. A. Micronutrient content and geometrical features of grain sorghum subjected to water stress. **Chemistry Proceedings**, v. 10, n. 1, p. 25, 2022.
- NDABANKULU, K. et al. Soil microbes and associated extracellular enzymes largely impact nutrient bioavailability in acidic and nutrient poor grassland ecosystem soils. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 12601, 2022.
- NELSON, William. Investigating resource competition in cereal-legume intercropping systems. 2020. Tese de Doutorado. Dissertation, Göttingen, Georg-August Universität, 2019.
- NETO, D. P. M. T. et al. Oxides and oxy-sulphates as sources of micronutrients in the construction of the fertility of an oxisol. **Journal of bioenergy and food science**, v. 6, n. 4, p. 109-118, 2019.
- NICHOLLS, C. I. et al. Agroecologia e o desenho de sistemas agrícolas resilientes às mudanças climáticas. *Agriculturas: experiências em agroecologia*. **Caderno de Debates**, n. 2, 2015.
- NONG, Q. et al. Sugarcane root transcriptome analysis revealed the role of plant hormones in the colonization of an endophytic diazotroph. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 924283, 2022.
- NOVAK, E. et al. Composição química do solo em diferentes condições ambientais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 1063-1085, 2021.
- OBEROI, H. K.; SINGH, J.; TIWANA, U. S. Response of hybrid fodder sorghum in relation to sulfur fertilization and irrigation regimes in semi-arid region of North West India. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 8, p. 1787-1807, 2023.
- OGUNNIYI, J.E. Effects of Clay and Organic Matter Amendments on Water and Nutrient Retention of Sandy Soils; University of Warwick: Coventry, UK, 2017.
- OLLILA, Antero. The greenhouse effect definition. **Physical Science International Journal**, v. 23, n. 2, p. 1-5, 2019.
- OLIVEIRA, A. B. de; NASCIMENTO, C. W. A do. Formas de manganês e ferro em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 99-110, 2006.
- OLIVEIRA, D. P. et al. Weathering and clay formation in semi-arid calcareous soils from Northeastern Brazil. **Catena**, v. 162, p. 325-332, 2018.
- OLIVEIRA, F. S. de et al. Accumulation of macronutrients in cowpea and weeds in competition and under soil water deficit. **Bioscience. journal**. v. 35, n. 6, p. 1747-1757, 2019.

OLIVEIRA, J. D.; SOUSA, J. R. P.; OTAVIANO, J. J. S. Copper and cadmium bioavailability in soils of baixada maranhense. **Revista Eletrônica Científica Ensino Interdisciplinar**, v. 6, n. 19, 2020.

OLIVEIRA, M. L. J. et al. Availability and spatial variability of copper, iron, manganese and zinc in soils of the State of Ceará, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 3, p. 371-380, 2018.

OLIVEIRA, S. R. **Marcha de absorção e balanço de nutrientes no sistema solo-planta para o meloeiro fertirrigado**. 2017. 51 f. Dissertação (Mestrado em Horticultura Tropical) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2017.

ORGANIZAÇÃO DA NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS). América Latina e Caribe. Panorama da Segurança alimentar e nutricional. Sistemas Alimentares sustentáveis para acabar com a fome e a má nutrição. Santiago: FAO; 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (UNITED NATIONS). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015.

OSMAN, K. T.; OSMAN, K. T. Plant nutrients and soil fertility management. Soils: Principles, properties and management, p. 129-159, 2013.

OZIEGBE, O.; ALADESANMI, O. T.; AWOTOYE, O. O. Effect of biochar on the nutrient contents and metal recovery efficiency in sorghum planted on landfill soils. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, p. 2259-2270, 2019.

PAVINATO, P. S. et al. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 15615, 2020.

PEREIRA, C. S. et al. Avaliação de doses de enxofre em cultivares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 10, 2021.

PÉREZ, D. V.; RIGO, M. M.; MARQUES, M. C. Fase Líquida: a Solução do Solo. In: O Solo: Estrutura e Composição”. 1ª ed. São Carlos: **Editora Cubo**, 2022. Cap. 7, p. 99-107

PESSOA, Luiz GM et al. Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 141, p. 109139, 2022.

PINTO, W. S. Soil zinc availability from inorganic and chelated zinc sources and its accumulation in maize, evaluated by Kinetica: a computational modeling platform. 2021.

POLAZZO, Francesco et al. Impacts of extreme climatic events on trophic network complexity and multidimensional stability. **Ecology**, v. 104, n. 2, p. e3951, 2023.

PORTELA, M. G. T. et al. Emissões de óxido nitroso em solo com cultivo de cana-de-açúcar sobre palhada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, p. 1-9, 2018.

PRADO, Renato de Mello. Nutrição de plantas. 2. ed. São Paulo: **Editora Unesp**, 2021.

PRESTON, W. et al. Soil fertility changes in vineyards of a semiarid region in Brazil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, n. 3, p. 672-685, 2017.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. São Paulo; Piracicaba: Ceres, **Potafos**, 1991. 343p.

RAIJ, B. VAN. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba, Instituto de Potassa & Fosfato, **Instituto Internacional da Potassa**, 1981. 142 p.

RAIJ, B. VAN. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: **International Plant Nutrition Institute**, 2011. 420p

RAMASAMY, S.; CHANDRASEKAR, V.; BHARATHY, A.M.V. Classification of Nutrient Deficiencies in Plants Using Recurrent Neural Network. In: 2022 IEEE Fourth International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC). IEEE, 2022. p. 1-7.

RASHED, M. H. et al. Manganese as a micronutrient in agriculture: crop requirement and management. **Journal of Environmental Science and Natural Resources**, v. 12, n. 1-2, p. 225-242, 2019.

RAY, Deepak K. et al. Climate change has likely already affected global food production. **PloS one**, v. 14, n. 5, p. e0217148, 2019.

RAWAL, N. et al. Soil Nutrient Balance and Soil Fertility Status under the Influence of Fertilization in Maize- Wheat Cropping System in Nepal. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2022, n. 1, p. 2607468, 2022.

RECENA, R.; GARCÍA-LÓPEZ, A. M.; DELGADO, A. Zinc uptake by plants as affected by fertilization with Zn sulfate, phosphorus availability, and soil properties. **Agronomy**, v. 11, n. 2, p. 390, 2021.

REDDY, M. G. et al. Intercropping-An Approach towards Sustainability in Dry Land Agriculture. **Int. J. Environ. Clim. Change**, v. 13, n. 9, p. 182-190, 2023.

REDDY, S. J.; AMORIM NETO, M. S. Dados de precipitação, evapotranspiração potencial, radiação solar global de alguns locais e classificação climática do Nordeste do Brasil. Petrolina: EMBRAPA/CPATSA, 280 p, 1983.

REICHARDT, Klaus. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações [apresentação]. Barueri, SP: **Manole**, 2022.

RENJITH, P. S.; RADHAKRISHNAN, S. K.; PATEL, A. Grass-Legume Intercropping for Enhancing Quality Fodder Production in Drylands. In: Enhancing Resilience of Dryland Agriculture Under Changing Climate: Interdisciplinary and Convergence Approaches. Singapore: **Springer Nature Singapore**, 2023. p. 575-583.

RESENDE, A.V et. al. É hora de usar a poupança de nutrientes do seu solo, **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo - RS, V. 2022, p. 15-23, 2022.

RESENDE, A.V. et al. Balanço de nutrientes e manejo da adubação em solos de fertilidade construída. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.10, p.342-398, 2019.

REZENDE, M. G. G.; WITKOSKI, A. C.; FRAXE, T. J. P. Estratégias de conservação ambiental e a materialização da gestão cibernética na Comunidade São Francisco (Careiro da Várzea, Amazonas) Acta Scientiarum. **Human and Social Sciences**, vol. 41, núm. 3, 2019.

RIBEIRO, J. C. Impacto, excelência e produtividade das ciências agrárias no Brasil 4. Ponta Grossa, PR: **Atena**, 2020.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais - 2.ed. - Campinas: Embrapa Territorial, 2020. 34 p.: il.; (**Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** / Embrapa Territorio, ISSN 1806-3322; 35).

ROPI, N. A. M. et al. Effect of different types of fertilizer application on the soil fertility of oil palm reclamation soil under polyculture system. **Journal of Agrobiotechnology**, v. 11, n. 2, p. 1-11, 2020.

ROSA, M. A. B. et al. Characterization of forage, sweet and biomass sorghum for agronomic performance and ensilability. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 21, p. e1239, 2022.

ROSOLEM, C. A.; STEINER, F. Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 5, p. 658-666, 2017.

ROWLEY, Mike C. et al. Evidence linking calcium to increased organo-mineral association in soils. **Biogeochemistry**, v. 153, n. 3, p. 223-241, 2021.

ROY, S. K. et al. Proteome characterization of copper stress responses in the roots of sorghum. **Biometals**, v. 30, p. 765-785, 2017.

RYAN, M. R. Crops better when grown together. **Nature Sustainability**, v. 4, n. 11, p. 926-927, 2021.

SAGWAL, Aaditya et al. Essentiality of Micronutrients in Soil: A Review. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 35, n. 24, p. 56-65, 2023.

SAHRAWAT, K. L. How fertile are semi-arid tropical soils?. **Current Science**, p. 1671-1674, 2016.

SAIKIA, P. et al. **Tropical legumes: Status, distribution, biology and importance**. The Plant Family Fabaceae: Biology and Physiological Responses to Environmental Stresses, p. 27-41, 2020.

SALAMOVA, A. S.; KANTEMIROVA, M.; STATSENKO, E. Dynamics and Accounting of GHG Emissions in the World. In: **BIO Web of Conferences**. EDP Sciences, 2023. p. 06011.

SALEEM, S. et al. Plant nutrition and soil fertility: physiological and molecular avenues for crop improvement. In: Sustainable Plant Nutrition. **Academic Press**, 2023. p. 23-49.

SAMMAMA, H. et al. Potential effect of intercropping in the control of weeds, diseases, and pests in a wheat-faba bean system. **Acta agriculturae Slovenica**, v. 119, n. 1, p. 1–11–1–11, 2023.

SAMUELSON, O. E. et al. Climate Change; Our Impact on the Climate and its Consequences; A Cross-sectional Study. **International Journal of Scientific Advancements**, v. 3, n. 3, 31 dez. 2021. Disponível em: Climate Change; Our Impact on the Climate and its Consequences; A Cross-sectional Study (ijscia.com). Acesso em: 23 de Fev 2024.

SANTILLI, J. **Agrobiodiversidade e direitos dos agricultores** – São Paulo: Peirópolis, 2009.

SANTOS F.C. et al. Arranjo de plantas de braquiária em consórcio com a cultura do milho. Sete Lagoas - MG: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2014.

SANTOS FC, RESENDE AV, COELHO AM. **Exigências nutricionais e adubação**. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (Ed.). Embrapa. Brasília-DF, 2015.

SANTOS, A. P. et al. Sunflower fertigated with potassium fertilization in two agricultural seasons in the Brazilian semiarid region. **Revista Ciencia Agronomica**, v.51, p.1-9, 2020.

SANTOS, E N. et al. Differential response of tree species from Brazilian tropical dry Forest (Caatinga) to phosphorus doses associated with organic matter. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 8, p. 1491-1503, 2023.

SANTOS, F.; HERNDON, E. Plant- soil relationships influence observed Trends between manganese and carbon across biomes. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 37, n. 1, p. e2022GB007412, 2023.

SANTOS, FC dos et al. Effect of nitrogen and potassium fertilisation on nutrition and macronutrients extraction by biomass sorghum. **Associação brasileira de milho e sorgo**, Vol. 14, Iss: 1, pp 10-22. 2015.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, E.F. **Mecanismos de interação fósforo-zinco no sistema solo-planta: disponibilidade no solo, avaliações fisiológicas e expressão de transportadores de fosfato**. 2018. 126 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciências, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

SANTOS, L. F. d.; SODRÉ, F. F.; MARTINS, É. d. S.; FIGUEIREDO, C. C. d.; BUSATO, J. G. Efeitos de biotita sienito sobre os níveis de nutrientes e cargas elétricas em Latossolo de Cerrado: Effects of finely ground biotite syenite. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, 2021.

SANTOS, M. G. dos et al. Yield and Quality of Naturally Colored Cotton Fiber Fertilized with Phosphorus Rates in the Brazilian Semiarid. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 2, p. 2214385, 2023.

SANTOS, U. J. dos et al. Nitrogen stocks in soil classes under different land uses in the Brazilian semiarid region. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 1621-1630, 2021.

SANTOS, W. O. et al. Zinc diffusion and availability affected by different sources in soils of contrasting textures. **Journal of Agricultural Sciences**. v. 11, p. 259-270, 2019.

SATHEE, Lekshmy et al. Elevated atmospheric CO₂ induced changes in nitrogen metabolism and crop quality. In: Climate Change and Crop Stress. **Academic Press**, 2022. p. 71-94.

SATHYANARAYAN, S. R. et al. Soil free nutrient availability to plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 5, p. 801-814, 2023.

SEIXAS, C. D. S. et. al. **Tecnologias de Produção de Soja**. Londrina - PR: Embrapa Soja, 2020. 347 p.

SELIGMAN, H. K. et al. Assessing and monitoring nutrition security to promote healthy dietary intake and outcomes in the United States. **Annual Review of Nutrition**, v. 43, p. 409-429, 2023.

SEMAHEGN, Z. Intercropping of cereal with legume Crops. **International Journal of Research in Agronomy**, v. 5, n. 1, p. 26-31, 2022.

SENTELHAS, P. C.; MONTEIRO, J. E. B. de A. **Agrometeorologia dos cultivos: informações para uma agricultura sustentável**. In: MONTEIRO, J. E. B. de A. (Org.). *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. Brasília, DF: INMET, 2009. v. 1, p. 5-15.

SHABTAI, I. A. et al. Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 6609, 2023.

SHIRAIWA, Manabu. Facing global climate and environmental change. **ACS Environmental Au**, v. 3, n. 3, p. 121-122, 2023.

SIGNOR, D. et al. Emissões de gases do efeito estufa do solo em sistema de produção de caprinos no semiárido brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 52, p. e72371, 2022. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/72371>. Acesso em: 16 abr. 2023.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 3, p. 322–338, jul. 2013.

SILVA, A. O.; BASSOI, L. H.; SILVA, D. J. Nitrate and potassium movement in a sandy loam soil cultivated with fertigated grapevine (*Vitis vinifera* L.) in the Brazilian semiarid. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 5, p. 1-14, 2017.

SILVA, F. de F. et al. Potassic and nitrogen fertilization in a modern hybrid of sorghum for biomass production cultivated in an Oxisol. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 1, p. 179-186, 2020.

SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes** (2. ed.), revisada e ampliada edn. EMBRAPA, Brasília, DF, 2009.

SILVA, J. A. et al. Growth, yield and nutrients of sweet cassava fertilized with zinc. **Ciência Rural**, v. 53, p. e20220064, 2023.

SILVA, J. V. C. **Participação de leguminosas herbáceas em pastagens consorciadas com Brachiaria decumbens Stapf**, 2018. 75 f.: il. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

SIMIONI, T.A. et al. Potencialidade da consorciação de gramíneas e leguminosas forrageiras em pastagens tropicais. **PUBVET**, Londrina, V. 8, N. 13, Ed. 262, Art. 1742, julho, 2014.

SINGH, A. K. et al. Understanding soil carbon and phosphorus dynamics under grass-legume intercropping in a semi-arid region. **Agronomy**, v. 13, n. 7, p3. 1692, 2023.

ŠKOLNÍKOVÁ, M.; ŠKARPA, P. Effect of nitrogen, sulphur and zinc application on sorghum biomass yield. **Field Crops Research**, v. 106, n. 1, p. 34-43, 2019.

SKWIERAWSKA, M. Effect of different sulfur doses and forms on the content of sulfur and available potassium in soil. **Journal of Elementology**, v. 16, n. 2, 2011.

SLIMANI, I. et al. Reviews and syntheses: Iron: A driver of nitrogen bioavailability in soils?. **Biogeosciences Discussions**, v. 2022, p. 1-40, 2022.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; GOEDERT, W J. Manejo da fertilidade do solo no Cerrado. **Agricultura Tropical**, p. 203, 2008.

SOUZA, H. A. de et al. Exportação e balanço de nutrientes de culturas agrícolas do Nordeste brasileiro. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2023.

SOUZA, H. A. et al. Phosphate fertilization in ‘sabiá’ (*Mimosa caesalpinhiifolia* Benth.) implantation in crop-forest system in semiarid region. **Brazilian Journal Agrária**, v. 17, p. 2, 2022.

SOUZA, J. P. et al. Características morfogênicas, estruturais e agrônômicas de gramíneas tropicais: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e942986588, 2020.

SPARROW, L. A.; UREN, N. C. Manganese oxidation and reduction in soils: effects of temperature, water potential, pH and their interactions. **Soil Research**, v. 52, p. 483-494, 2014.

STAFILOV, T.; ŠAJN, R.; ALIJAGIĆ, J. Investigations of Chemical Element Distributions in Soil, North Macedonia—A Review. **Minerals**, v. 14, n. 3, p. 325, 2024.

STALIN, P. et al. Studies on the response of millets, pulses and oilseeds to Zinc fertilization in red soils. **Advances in Applied Research**, v. 3, n. 2, p. 134-145, 2011.

STRAWN, Daniel G. Sorption mechanisms of chemicals in soils. **Soil Systems**, v. 5, n. 1, p. 13, 2021.

SUNDSTROM, S. M.; HODBOD, J.; ALLEN, C. R. Resilience of Working Agricultural Landscapes. In: Food, Energy, and Water Nexus: A Consideration for the 21st Century. **Cham: Springer International Publishing**, 2022. p. 11-31.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. trad. Alexandra Antunes Mastroberti. [et. Al.]. – 6ª. ed. – Porto Alegre: **Artmed**, 2017.

TARARIKO, Yu O.; LUKASHUK, V. P. Prospects for international integrated research of the carbon cycle in the system" soil-plant-atmosphere". **Land Reclamation and Water Management**, n. 1, p. 136-144, 2021.

TAVORA, F. L.; FRANÇA, F. F. Impacto das mudanças climáticas na agropecuária brasileira e os desafios para a segurança alimentar e humana. Brasília: **Escola Superior de defesa**, 2021.

TEIXEIRA, P. C. et al. (org.). **Manual de métodos de análise de solo 3**. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TORETI, A. et al. Climate service driven adaptation may alleviate the impacts of climate change in agriculture. **Communications Biology**, v. 5, n. 1, p. 1235, 2022.

TOVI, N. et al. Pairwise interactions of three related pseudomonas species in plant roots and inert surfaces. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 666522, 2021.

THOMPSON, William J. et al. Smallholder farmer resilience to extreme weather events in a global food value chain. **Climatic Change**, v. 176, n. 11, p. 152, 2023.

UNFCCC. - United Nations Framework Convention on Climate Change. Adaptation assessment, planning and practice: an overview from the Nairobi work programme on impacts, vulnerability and adaptation to climate change. Bonn: UNFCCC, 2010.

VANDERMEER, John et al. Global change and multi-species agroecosystems: concepts and issues. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 67, n. 1, p. 1-22, 1998.

VAN DEN HEEVER, Juri; JONES, Chris. Building blocks of agriculture. **HTS Teologiese Studies/Theological Studies**, v. 78, n. 2, 2022.

VASCONCELLOS, T. J. de et al. Chemical elements analysis of the soil at an urbanization gradient in the atlantic forest. **Revista Árvore**, v. 45, p. e4504, 2021.

VIDAL, A. Exigências de macronutrientes pela cultura da soja. **Elevagro**, 2020.

VIEIRA, M. S. et al. Phosphorus sorption isotherms in soils of the semiarid region of Brazil. **Revista Caatinga**, v. 34, p. 166–176, 2021.

- VITAL, A. F. M. et al. Caracterização de um solo salinizado em área irrigada da região Semiárida. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável** VOL. 10 (4), p. 28-32, 2015.
- WALKER, J.; WALKER, J. Genealogies of Resilience: From Conservation to Disaster Adaptation. *More Heat than Life: The Tangled Roots of Ecology, Energy, and Economics*, p. 311-339, 2020.
- WANG, J. et al. Changes in plant nutrient status following combined elevated [CO₂] and canopy warming in winter wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1132414, 2023.
- WEI, Zhang et al. Legume nutrition is improved by neighbouring grasses. **Plant and Soil**, v. 475, n. 1, p. 443-455, 2022.
- YADAV, Durgesh Singh et al. Soil acidification and its impact on plants. **Plant responses to soil pollution**, p. 1-26, 2020.
- YOSHIMOTO, S. et al. Effects of potassium on hydrothermal carbonization of sorghum bagasse. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 10, n. 1, p. 24, 2023.
- ZAITUNIGULI, K. et al. Impact of fertilisers on soil properties and biomass yield under a long-term sweet sorghum cropping system. **Plant, Soil & Environment**, v. 67, n. 5, 2021.
- ZANDONADI, César Henrique Souza et al. Agronomic characteristics and macronutrient export of grain sorghum hybrids from different sowing dates. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 1, p. 07-14, 2017.
- ZHOU, Weiwei et al. Nitrate leaching is the main driving factor of soil calcium and magnesium leaching loss in intensive plastic-shed vegetable production systems. **Agricultural Water Management**, v. 293, p. 108708, 2024.
- ZHU, Yiming. The Influence of Greenhouse Effect on Earth's Atmosphere Based on Artificial Intelligence. In: E3S Web of Conferences. **EDP Sciences**, 2023. p. 01008.
- ZINN, Y. L.; FARIA, J. A.; ARAUJO, M. A.; SKORUPA, A. L. A. Soil parent material is the main control on heavy metal concentrations in tropical highlands of Brazil. **Catena**, v. 185, 2020.

ANEXOS

Anexo 1 – Condição final do solo (médias $\pm$ erro padrão) no primeiro ciclo de cultivo (30/06/2021 a 27/09/2021) em um Argissolo em Petrolina-PE.

Tratamentos	CICLO I							
	P mg/dm ³	K	Ca cmolc/dm ³	Mg	Cu	Fe mg/dm ³	Mn	Zn
BRS 716	11,92 $\pm$ 4,07	0,14 $\pm$ 0,02	1,2 $\pm$ 0	0,6 $\pm$ 0,1	1,31 $\pm$ 0,59	17,73 $\pm$ 5,94	21,01 $\pm$ 1	26,98 $\pm$ 2,27
Agri002e	16,43 $\pm$ 15,55	0,13 $\pm$ 0,02	1,43 $\pm$ 0,21	0,69 $\pm$ 0,12	0,82 $\pm$ 0,16	13,02 $\pm$ 3,44	20,83 $\pm$ 2,76	19,04 $\pm$ 2,72
BRS716 + BRS Itaim	19,26 $\pm$ 14,62	0,21 $\pm$ 0,05	1,8 $\pm$ 0,44	0,93 $\pm$ 0,32	1,27 $\pm$ 0,34	44,22 $\pm$ 4,96	40,34 $\pm$ 1,88	30,33 $\pm$ 39,17
Agri002e + BRS Itaim	10,12 $\pm$ 3,91	0,24 $\pm$ 0,05	1,77 $\pm$ 0,25	0,8 $\pm$ 0,2	1,25 $\pm$ 0,25	46,31 $\pm$ 8,88	39,62 $\pm$ 0,6	31,09 $\pm$ 4,77
BRS716 + BRS Gurgueia	14,51 $\pm$ 8,9	0,32 $\pm$ 0,09	1,5 $\pm$ 0,26	0,77 $\pm$ 0,12	1,27 $\pm$ 0,31	29,74 $\pm$ 18,58	38,65 $\pm$ 3,5	71,75 $\pm$ 73,73
Agri002e + BRS Gurgueia	14,06 $\pm$ 2,64	0,46 $\pm$ 0,15	1,57 $\pm$ 0,4	0,8 $\pm$ 0,26	1,14 $\pm$ 0,11	44,44 $\pm$ 0,94	38,2 $\pm$ 3,22	99,96 $\pm$ 26,4
BRS716 + BRS Guariba	13,43 $\pm$ 7,12	0,26 $\pm$ 0,07	1,67 $\pm$ 0,23	0,8 $\pm$ 0,17	0,99 $\pm$ 0,09	60,76 $\pm$ 39,43	33,34 $\pm$ 1,53	89,64 $\pm$ 80,12
Agri002e + BRS Guariba	11,01 $\pm$ 0,94	0,26 $\pm$ 0,06	1,73 $\pm$ 0,23	0,83 $\pm$ 0,15	1,18 $\pm$ 0,2	41,92 $\pm$ 2,68	33,97 $\pm$ 4,33	92,45 $\pm$ 113,92
BRS716 + BRS Carijó	12,16 $\pm$ 3,64	0,21 $\pm$ 0,02	1,23 $\pm$ 0,06	0,6 $\pm$ 0	1,06 $\pm$ 0,11	57,85 $\pm$ 30,14	27,6 $\pm$ 2,15	45,9 $\pm$ 26,11
Agri002e + BRS Carijó	17,89 $\pm$ 11,87	0,22 $\pm$ 0,03	1,23 $\pm$ 0,06	0,67 $\pm$ 0,12	0,92 $\pm$ 0,07	43,27 $\pm$ 2,99	27,07 $\pm$ 2,29	55,59 $\pm$ 32,6

Anexo 2 – Condição final do solo (médias $\pm$ erro padrão) no segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022) em um Argissolo em Petrolina-PE.

Tratamentos	P mg/dm ³	K	Ca cmolc/dm ³	CICLO II		Cu	Fe	Mn mg/dm ³	Zn
				Mg					
BRS 716	5,6 $\pm$ 2,75	0,13 $\pm$ 0,03	1,47 $\pm$ 0,12	0,7 $\pm$ 0,1		1,32 $\pm$ 0,92	26,52 $\pm$ 14,51	36,89 $\pm$ 3,65	2,08 $\pm$ 0,44
Agri002e	6,3 $\pm$ 2,28	0,13 $\pm$ 0,03	1,8 $\pm$ 0,53	0,85 $\pm$ 0,22		0,69 $\pm$ 0,03	26,46 $\pm$ 8,42	32,95 $\pm$ 2,48	21,04 $\pm$ 32,87
BRS716 + BRS Itaim	17,08 $\pm$ 11,41	0,2 $\pm$ 0,03	1,5 $\pm$ 0,17	0,8 $\pm$ 0,1		1,35 $\pm$ 1,17	37,66 $\pm$ 29	67,14 $\pm$ 14,18	173,3 $\pm$ 149,02
Agri002e + BRS Itaim	5,89 $\pm$ 2,99	0,18 $\pm$ 0,02	1,5 $\pm$ 0,1	0,73 $\pm$ 0,06		2,53 $\pm$ 2,99	23,25 $\pm$ 14,14	71,84 $\pm$ 24,05	70,44 $\pm$ 119,09
BRS716 + BRS Gurgueia	7,47 $\pm$ 6,45	0,21 $\pm$ 0,04	1,6 $\pm$ 0,2	0,8 $\pm$ 0,17		0,73 $\pm$ 0,21	15,65 $\pm$ 7	51,43 $\pm$ 10,33	5,57 $\pm$ 5,61
Agri002e + BRS Gurgueia	10,81 $\pm$ 9,33	0,18 $\pm$ 0,03	1,4 $\pm$ 0,17	0,73 $\pm$ 0,12		0,55 $\pm$ 0,15	28,11 $\pm$ 23,31	55,8 $\pm$ 16,78	1,38 $\pm$ 0,34
BRS716 + BRS Guariba	6,97 $\pm$ 2,86	0,25 $\pm$ 0,01	1,73 $\pm$ 0,42	0,8 $\pm$ 0,2		1,06 $\pm$ 0,61	49,88 $\pm$ 18,54	80,74 $\pm$ 22,13	11,65 $\pm$ 15,53
Agri002e + BRS Guariba	9,23 $\pm$ 2,77	0,2 $\pm$ 0,05	1,53 $\pm$ 0,42	0,7 $\pm$ 0,26		0,58 $\pm$ 0,21	20,39 $\pm$ 6,43	49,95 $\pm$ 8,04	1,5 $\pm$ 0,15
BRS716 + BRS Carijó	8,58 $\pm$ 4,41	0,19 $\pm$ 0,05	1,57 $\pm$ 0,38	0,73 $\pm$ 0,23		0,5 $\pm$ 0,17	34,27 $\pm$ 6,81	44,46 $\pm$ 1,86	3,32 $\pm$ 2,57
Agri002e + BRS Carijó	7 $\pm$ 4,28	0,19 $\pm$ 0,03	1,2 $\pm$ 0	0,6 $\pm$ 0,1		0,65 $\pm$ 0,07	46,31 $\pm$ 24,42	44,43 $\pm$ 0,63	1,12 $\pm$ 0,28

Anexo 3 – Estoque final de nutrientes no solo (médias $\pm$ erro padrão) no primeiro ciclo de cultivo (30/06/2021 a 27/09/2021) em um Argissolo em Petrolina- PE

Tratamentos	CICLO I							
	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----Kg/ha -----							
BRS 716	34,56 $\pm$ 11,8	158,34 $\pm$ 19,59	696 $\pm$ 0	208,8 $\pm$ 34,8	3,79 $\pm$ 1,71	51,43 $\pm$ 17,22	60,92 $\pm$ 2,9	78,24 $\pm$ 6,58
Agri002e	47,66 $\pm$ 45,08	147,03 $\pm$ 19,59	831,33 $\pm$ 120,74	240,12 $\pm$ 40,13	2,38 $\pm$ 0,46	37,77 $\pm$ 9,98	60,4 $\pm$ 8	55,23 $\pm$ 7,9
BRS716 + BRS Itaim	55,86 $\pm$ 42,39	241,28 $\pm$ 58,04	1044 $\pm$ 252,82	324,8 $\pm$ 111,87	3,68 $\pm$ 0,99	128,25 $\pm$ 14,4	116,98 $\pm$ 5,44	87,96 $\pm$ 113,61
Agri002e + BRS Itaim	29,35 $\pm$ 11,35	267,67 $\pm$ 58,04	1024,67 $\pm$ 145,96	278,4 $\pm$ 69,6	3,62 $\pm$ 0,73	134,3 $\pm$ 25,74	114,89 $\pm$ 1,73	90,17 $\pm$ 13,83
BRS716 + BRS Gurgueia	42,08 $\pm$ 25,8	358,15 $\pm$ 104,48	870 $\pm$ 153,45	266,8 $\pm$ 40,18	3,68 $\pm$ 0,9	86,26 $\pm$ 53,88	112,09 $\pm$ 10,15	208,07 $\pm$ 213,82
Agri002e + BRS Gurgueia	40,76 $\pm$ 7,66	520,26 $\pm$ 174,12	908,67 $\pm$ 234,4	278,4 $\pm$ 92,07	3,3 $\pm$ 0,32	128,89 $\pm$ 2,74	110,78 $\pm$ 9,32	289,88 $\pm$ 76,56
BRS716 + BRS Guariba	38,94 $\pm$ 20,65	294,06 $\pm$ 78,36	966,67 $\pm$ 133,95	278,4 $\pm$ 60,28	2,88 $\pm$ 0,26	176,19 $\pm$ 114,36	96,69 $\pm$ 4,45	259,96 $\pm$ 232,36
Agri002e + BRS Guariba	31,92 $\pm$ 2,72	294,06 $\pm$ 70,63	1005,33 $\pm$ 133,95	290 $\pm$ 53,16	3,43 $\pm$ 0,59	121,56 $\pm$ 7,78	98,5 $\pm$ 12,55	268,11 $\pm$ 330,35
BRS716 + BRS Carijó	35,25 $\pm$ 10,54	241,28 $\pm$ 26,12	715,33 $\pm$ 33,49	208,8 $\pm$ 0	3,08 $\pm$ 0,32	167,77 $\pm$ 87,39	80,05 $\pm$ 6,24	133,11 $\pm$ 75,71
Agri002e + BRS Carijó	51,89 $\pm$ 34,43	252,59 $\pm$ 36,36	715,33 $\pm$ 33,49	232 $\pm$ 40,18	2,68 $\pm$ 0,21	125,47 $\pm$ 8,67	78,51 $\pm$ 6,63	161,2 $\pm$ 94,54

Anexo 4 – Estoque final de nutrientes no solo (médias $\pm$ erro padrão) no segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022) em um Argissolo em Petrolina- PE.

Tratamentos	P	K	Ca	CICLO II				
				Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
				-----Kg/ha -----				
BRS 716	16,25 $\pm$ 7,96	143,26 $\pm$ 28,46	850,67 $\pm$ 66,97	243,6 $\pm$ 34,8	3,83 $\pm$ 2,66	76,91 $\pm$ 42,08	106,97 $\pm$ 10,58	6,02 $\pm$ 1,28
Agri002e	18,27 $\pm$ 6,62	143,26 $\pm$ 32,65	1044 $\pm$ 306,91	295,8 $\pm$ 75,84	1,99 $\pm$ 0,09	76,74 $\pm$ 24,41	95,56 $\pm$ 7,2	61,01 $\pm$ 95,32
BRS716 + BRS Itaim	49,53 $\pm$ 33,09	226,2 $\pm$ 29,92	870 $\pm$ 100,46	278,4 $\pm$ 34,8	3,92 $\pm$ 3,38	109,21 $\pm$ 84,09	194,7 $\pm$ 41,13	502,57 $\pm$ 432,16
Agri002e + BRS Itaim	17,08 $\pm$ 8,68	203,58 $\pm$ 19,59	870 $\pm$ 58	255,2 $\pm$ 20,09	7,33 $\pm$ 8,67	67,42 $\pm$ 41	208,33 $\pm$ 69,76	204,28 $\pm$ 345,35
BRS716 + BRS Gurgueia	21,67 $\pm$ 18,71	237,51 $\pm$ 40,78	928 $\pm$ 116	278,4 $\pm$ 60,28	2,13 $\pm$ 0,62	45,39 $\pm$ 20,29	149,16 $\pm$ 29,95	16,15 $\pm$ 16,27
Agri002e + BRS Gurgueia	31,36 $\pm$ 27,05	199,81 $\pm$ 28,46	812 $\pm$ 100,46	255,2 $\pm$ 40,18	1,59 $\pm$ 0,43	81,52 $\pm$ 67,61	161,81 $\pm$ 48,66	4 $\pm$ 0,99
BRS716 + BRS Guariba	20,22 $\pm$ 8,3	282,75 $\pm$ 11,31	1005,33 $\pm$ 241,47	278,4 $\pm$ 69,6	3,06 $\pm$ 1,77	144,64 $\pm$ 53,77	234,16 $\pm$ 64,18	33,79 $\pm$ 45,05
Agri002e + BRS Guariba	26,76 $\pm$ 8,02	222,43 $\pm$ 55,79	889,33 $\pm$ 241,47	243,6 $\pm$ 92,07	1,68 $\pm$ 0,61	59,14 $\pm$ 18,65	144,86 $\pm$ 23,31	4,36 $\pm$ 0,42
BRS716 + BRS Carijó	24,88 $\pm$ 12,79	211,12 $\pm$ 51	908,67 $\pm$ 219,58	255,2 $\pm$ 80,37	1,44 $\pm$ 0,5	99,39 $\pm$ 19,75	128,93 $\pm$ 5,38	9,64 $\pm$ 7,46
Agri002e + BRS Carijó	20,29 $\pm$ 12,41	211,12 $\pm$ 32,65	696 $\pm$ 0	208,8 $\pm$ 34,8	1,88 $\pm$ 0,21	134,29 $\pm$ 70,82	128,85 $\pm$ 1,82	3,25 $\pm$ 0,8

Anexo 5 – Teores de nutrientes na planta (médias $\pm$ erro padrão) no primeiro ciclo de cultivo (30/06/2021 a 27/09/2021) em um Argissolo em Petrolina- PE

Tratamentos	CICLO I										
	P	K	Na	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----g/Kg-----						-----mg/Kg-----				
BRS 716	1,36 ± 0,6	8,17 ± 0,29	176,67 ± 66,58	1,84 ± 0,41	1,96 ± 0,14	1,48 ± 0,74	51,25 ± 9,97	17,85 ± 0,87	143,39 ± 14,85	99,61 ± 16,64	29,33 ± 4,4
Agri002e	1,28 ± 0,26	7,17 ± 0,29	210 ± 0	1,78 ± 0,57	1,64 ± 0,09	2,29 ± 0,51	54,54 ± 9,68	16,15 ± 0,29	122,14 ± 5,74	93,47 ± 25,49	25,98 ± 2,06
BRS716 + BRS Itaim	1,59 ± 0,17	8,83 ± 1,76	103,33 ± 35,12	2,17 ± 0,9	1,66 ± 0,4	1,97 ± 0,87	47,27 ± 11,33	16,24 ± 0,45	128,87 ± 6,5	80,89 ± 11,86	33,09 ± 9,06
Agri002e + BRS Itaim	2,04 ± 0,56	7,67 ± 1,04	143,33 ± 118,46	2,35 ± 0,85	1,54 ± 0,14	2,45 ± 0,64	50,08 ± 25,98	17,83 ± 2,3	138,32 ± 19,78	99,6 ± 5,77	41,94 ± 6,56
BRS716 + BRS Gurgueia	1,71 ± 0,47	8,5 ± 2,18	90 ± 17,32	3,33 ± 1,4	1,7 ± 0,13	1,32 ± 0,37	44,18 ± 18,69	17,21 ± 0,78	129,07 ± 20,79	67,78 ± 9,3	36,15 ± 6,3
Agri002e + BRS Gurgueia	1,62 ± 0,37	8,17 ± 0,29	140 ± 96,44	2,16 ± 0,66	1,53 ± 0,28	2,39 ± 1,6	60,92 ± 18,76	17,86 ± 0,87	145,75 ± 14,04	91,26 ± 23,51	37,37 ± 5,77
BRS716 + BRS Guariba	2,38 ± 1,14	8,83 ± 1,26	93,33 ± 25,17	1,93 ± 0,53	1,92 ± 0,08	1,79 ± 0,63	45,76 ± 6,19	17,37 ± 1,02	174,17 ± 54,07	56,79 ± 18,29	34,85 ± 4,53
Agri002e + BRS Guariba	1,78 ± 0,05	7,17 ± 0,76	136,67 ± 100,17	2,39 ± 0,94	1,53 ± 0,21	2,28 ± 1,04	54,88 ± 27,8	16,76 ± 0,61	126,97 ± 27,76	77,54 ± 45,67	30,86 ± 2,21
BRS716 + BRS Carijó	2,67 ± 1,93	8,67 ± 8,67	90 ± 93,33	2,02 ± 1,96	1,74 ± 1,55	1,17 ± 2,97	44,18 ± 44,59	18,21 ± 17,86	139,72 ± 125,1	94,03 ± 97,71	45,45 ± 47,72
Agri002e + BRS Carijó	1,72 ± 0,18	7,33 ± 1,26	163,33 ± 81,45	1,84 ± 0,6	1,58 ± 0,18	3,27 ± 2,64	47,27 ± 25,13	17,59 ± 0,69	138,89 ± 26,92	119,43 ± 13,27	41,86 ± 4,66

Anexo 6 – Teores de nutrientes na planta (médias $\pm$ erro padrão) no segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022) em um Argissolo em Petrolina- PE.

Tratamentos	Ciclo II										
	P	K	Na	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----g/Kg-----						-----mg/Kg-----				
BRS 716	1,25 ± 0,1	4,17 ± 0,76	213,33 ± 5,77	1,48 ± 0,45	2,54 ± 0,3	5,35 ± 0,55	54,47 ± 5,37	21,45 ± 0,97	93,92 ± 8,35	54,11 ± 4,39	63,54 ± 4,86
Agri002e	1,09 ± 0,23	4,33 ± 0,58	220 ± 45,83	1,58 ± 0,14	2,46 ± 0,22	2,24 ± 0,95	56,26 ± 19,8	21,65 ± 0,56	82,43 ± 17,98	56,57 ± 14,79	61,65 ± 3,34
BRS716 + BRS Itaim	1,11 ± 0,16	5,17 ± 1,15	166,67 ± 75,06	2 ± 0,99	2,32 ± 0,34	2,41 ± 2,03	49,53 ± 10,31	18,57 ± 1,95	299,93 ± 366,33	51,62 ± 4,67	50,06 ± 20,66
Agri002e + BRS Itaim	1,04 ± 0,21	4,83 ± 1,89	166,67 ± 75,72	1,7 ± 1,1	2,34 ± 0,62	1,53 ± 0,57	51,59 ± 11,14	18,6 ± 4,23	106,66 ± 60,62	57,63 ± 4,24	51,81 ± 24,07
BRS716 + BRS Gurgueia	1,48 ± 0,39	5,67 ± 1,53	270 ± 174,36	1,55 ± 1,29	1,94 ± 0,52	3,3 ± 2,07	51,73 ± 12,14	19,75 ± 5,48	1598,48 ± 1380,53	44,42 ± 5,3	47,69 ± 25,75
Agri002e + BRS Gurgueia	1,09 ± 0,26	5,17 ± 0,76	173,33 ± 81,45	1,51 ± 0,83	2,14 ± 0,67	1,64 ± 0,76	52,76 ± 3,6	18,78 ± 5,69	133,51 ± 101,14	54,29 ± 8,99	52,25 ± 25,16
BRS716 + BRS Guariba	1,12 ± 0,24	5,33 ± 2,02	166,67 ± 66,58	2,25 ± 0,94	2,02 ± 0,29	1,46 ± 0,91	54,75 ± 8,86	20,75 ± 0,84	234,68 ± 140,01	32,12 ± 10,56	59,02 ± 2,33
Agri002e + BRS Guariba	1,26 ± 0,18	5,67 ± 2,93	160 ± 78,1	2,34 ± 0,93	2,51 ± 0,68	1,68 ± 0,26	56,46 ± 1,34	19,61 ± 3,42	132,23 ± 93,84	49,52 ± 16,45	57,13 ± 22,69
BRS716 + BRS Carijó	1 ± 0,21	5,17 ± 2,47	156,67 ± 75,06	1,38 ± 0,34	2,21 ± 0,61	3,85 ± 2,63	55,5 ± 10,09	18,76 ± 3,8	178,7 ± 145,41	45,04 ± 14,14	52,63 ± 21,16
Agri002e + BRS Carijó	1,34 ± 0,04	6,17 ± 2,93	193,33 ± 102,63	1,83 ± 0,23	2,63 ± 0,95	1,33 ± 0,62	56,39 ± 3,98	20,21 ± 5,4	322,92 ± 267,54	64,67 ± 26,07	54,82 ± 29,79

Anexo 7 – Produtividade de matéria seca total de sorgo (médias $\pm$ erro padrão) no primeiro e no segundo ciclo de cultivo (21/12/2021 a 04/05/2022) em um Argissolo em Petrolina- PE.

Tratamentos	Produtividade de matéria seca total kg/ha	
	Ciclo I	Ciclo II
BRS 716	15166,33 $\pm$ 3700,83	52073,13 $\pm$ 4954,54
Agri002e	27670,4 $\pm$ 4910,91	63866,33 $\pm$ 7847,59
BRS716 + BRS Itaim	6873,47 $\pm$ 1929,06	27871,09 $\pm$ 3155,28
Agri002e + BRS Itaim	11179,59 $\pm$ 3633,8	29193,88 $\pm$ 3972,5
BRS716 + BRS Gurgueia	7879,93 $\pm$ 1033,46	26764,97 $\pm$ 7543,99
Agri002e + BRS Gurgueia	10759,87 $\pm$ 2092,92	28387,76 $\pm$ 4967,5
BRS716 + BRS Guariba	7909,86 $\pm$ 320,42	34049,32 $\pm$ 2225,05
Agri002e + BRS Guariba	9641,16 $\pm$ 1052,61	34640,48 $\pm$ 5547,63
BRS716 + BRS Carijó	7501,36 $\pm$ 797,13	31119,73 $\pm$ 1331,03
Agri002e + BRS Carijó	11423,13 $\pm$ 2153,28	33680,95 $\pm$ 717,66