

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

FLÁVIA APARECIDA DE OLIVEIRA BEZERRA

**INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO
APÓS APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM CULTIVO DE CEBOLA NO
VALE DO SÃO FRANCISCO**

**RECIFE
2023**

Flávia Aparecida de Oliveira Bezerra

Bióloga

**Indicadores microbiológicos de qualidade do solo após aplicação de silício em cultivo de
cebola no Vale do São Francisco**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Profa. Dra. Giselle Gomes Monteiro Fracetto.

Coorientadores: Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento.

Dr. William Ramos da Silva.

**Recife
2023**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B574i Bezerra, Flávia Aparecida de Oliveira
Indicadores microbiológicos de qualidade do solo após aplicação de silício em cultivo de cebola no Vale do São Francisco / Flávia Aparecida de Oliveira Bezerra. - 2023.
61 f. : il.

Orientadora: Giselle Gomes Monteiro Fracetto.
Coorientador: Clistenes Williams Araujo do Nascimento.
Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2024.

1. Produtividade. 2. Adubação. 3. Allium cepa L. 4. Saúde do solo. I. Fracetto, Giselle Gomes Monteiro, orient. II. Nascimento, Clistenes Williams Araujo do, coorient. III. Título

CDD 631.4

FLÁVIA APARECIDA DE OLIVEIRA BEZERRA

**Indicadores microbiológicos de qualidade do solo após aplicação de silício em cultivo de
cebola no Vale do São Francisco**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em: 23 de novembro de 2023

Profa. Dra. Giselle Gomes Monteiro Fracetto
Orientadora
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Carvalho Basílio de Azevedo
Universidade Federal de Uberlândia

Dr. William Ramos da Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar saúde, forças e bons amigos nesta caminhada acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPQ por ter concedido a bolsa manutenção e desenvolvimento da pesquisa.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE pela infraestrutura e laboratórios e a todos que contribuíram para este trabalho.

A minha orientadora e professora, Giselle Fracetto, por todo conhecimento compartilhado, orientação, paciência e direcionamento durante todo este período. Sua alegria, inteligência e entusiasmo pelo que faz, me inspiraram ainda mais a seguir por este caminho. Sou muito grata e sempre serei por tudo o que fez por mim, por suas palavras e forma que me conduziu para que eu conseguisse alcançar o que me foi proposto.

Aos meus coorientadores William Ramos da Silva e Clístenes Williams Araújo do Nascimento por toda disponibilidade e coorientação, cada um de maneira singular fizeram toda diferença.

A minha família que sempre me incentivou a continuar estudando e persistindo em meus objetivos.

Ao meu noivo Davidson que sempre me apoiou em todos os momentos.

A todos os meus professores do Programa em Ciência do Solo, sou grata e afirmo a relevância e contribuição para o meu crescimento pessoal e profissional. Ao Professor Felipe Fracetto por toda paciência, competência e disponibilidade para me conduzir na busca pelo conhecimento. Ao Professor Mário Lira pelos conhecimentos compartilhados.

Aos amigos do laboratório, Nayara, Cintia, Alysson, Petrônio, Midouin. Nayara, sempre disponível a ajudar e compartilhar conhecimentos. Cintia, a qual sou muito grata por todo tempo, ajuda e disponibilidade para sanar as dúvidas em relação às análises. Aos amigos, Gabi, Gaby, Eduarda, Diogo, Mari e Gabriel sempre disponíveis a ajudar.

Ao Marcos Dias de Barros, pelo auxílio na seleção da área e montagem do experimento.

Aos amigos conquistados durante o curso, Pablo, Aline e aos amigos dos Laboratórios parceiros, Frank, Venâncio, Bruno, Luiz, Taciana, Rayanna, Marilya, Ana Luiza, Isabel, pessoas maravilhosas, inteligentes e que contribuíram significativamente nesta caminhada.

A querida Socorrinho que fez a diferença e deixou em mim boas lembranças e sentimentos.

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.”

(Provérbios 16:3)

Indicadores microbiológicos em solo com aplicação de silício no cultivo da cebola

RESUMO

A cebola (*Allium cepa* L.) é uma das hortaliças mais cultivadas e consumidas mundialmente e possui grande valor comercial. O silício é considerado um elemento benéfico, proporcionando às plantas resistência, rigidez às células vegetais, tolerância aos estresses hídricos, protegendo contra toxicidade de metais pesados e induzindo resistência à inseto-praga e fungos. O solo é de essencial importância para as funções de suporte à vida e a microbiota do solo possui um papel fundamental na condução dessas funções, sendo assim a utilização de fertilizante silicatado proporciona impactos sobre a comunidade microbiana do solo, melhorando suas condições e condicionando maior rendimento à cultura. Nesse sentido, indicadores microbiológicos são utilizados para monitoramento da degradação do solo e na avaliação de estratégias de manejo, com garantia da produtividade agrícola, principalmente em regiões economicamente importantes como no Vale do São Francisco. Assim, hipotetizou-se que a adubação com silício no cultivo da cebola aumenta a biomassa e atividade microbiana do solo. O objetivo foi avaliar a qualidade do solo a partir dos indicadores microbiológicos sob cultivo de cebola com aplicação de silício no Vale do São Francisco nas doses de 0 (testemunha), 75, 125, 175 e 225 kg ha⁻¹, com quatro repetições. Para isso, foi determinado o carbono da biomassa microbiana, a respiração basal do solo, os quocientes microbiano, metabólico e de mineralização e quantificada a atividade das enzimas: fosfatase alcalina, arilsulfatase, β-glucosidase e glomalina. A adubação com o silício aumentou biomassa microbiana e a atividade microbiana do solo, sendo os maiores valores para o carbono da biomassa observados nas doses de 75 e 125 kg ha⁻¹ (345,60 e 327,22 mg kg⁻¹, respectivamente), devido a maior concentração de C no solo. A aplicação do fertilizante silicatado promoveu o aumento da respiração basal do solo (C- CO₂), com os maiores valores de C-CO₂ observados na dose 225 kg ha⁻¹ (56,98 mg kg⁻¹), devido relação C /N. O silício não teve influência sob o Carbono orgânico total (COT), quociente microbiano (qMic), glomalina facilmente extraível e glomalina total. A aplicação do fertilizante silicatado promoveu o aumento dos quocientes de mineralização e metabólico, sendo os maiores valores de qCO₂ observados na dose de 225 kg ha⁻¹ (0,21 mg kg⁻¹) e o maior valor de qMin foi obtido na dose 225 kg ha⁻¹ (0,92 mg kg⁻¹). A aplicação do fertilizante silicatado determina um aumento na atividade enzimática da fosfatase alcalina, enquanto que a arilsulfatase e β-glucosidase apresentaram reduções com o aumento das doses. A aplicação das doses mais elevadas (225 kg ha⁻¹) foram mais eficientes. O Silício atua na microbiota do solo, influenciando os atributos microbiológicos e como mitigador de estresse bióticos e abióticos nas plantas, promovendo melhoria da produtividade da cultura da cebola.

Palavras-chave: Produtividade. Adubação. *Allium cepa* L. Saúde do solo.

Microbiological indicators in soils cultivated with onions and fertilized with silicon

ABSTRACT

The onion (*Allium cepa* L.) is one of the most widely grown and consumed vegetables in the world and has great commercial value. Silicon is considered a beneficial element, providing plants with resistance, rigidity to plant cells, tolerance to water stress, protection against heavy metal toxicity and inducing resistance to insect pests and fungi. The soil is of essential importance for life support functions and the soil microbiota plays a fundamental role in carrying out these functions, so the use of silicate fertilizer has an impact on the soil's microbial community, improving its conditions and leading to higher crop yields. In this sense, microbiological indicators are used to monitor soil degradation and evaluate management strategies to guarantee agricultural productivity, especially in economically important regions such as the São Francisco Valley. Thus, it was hypothesized that silicon fertilization in onion cultivation increases soil microbial biomass and activity. The aim was to evaluate soil quality based on microbiological indicators under onion cultivation with silicon application in the São Francisco Valley at doses of 0 (control), 75, 125, 175 and 225 kg ha⁻¹, with four replicates. For this purpose, the carbon of the microbial biomass, the basal respiration of the soil, the microbial, metabolic and mineralization quotients were determined and the activity of the enzymes was quantified: alkaline phosphatase, arylsulfatase, β -glucosidase and glomalin. Fertilizing with silicon increased microbial biomass and soil microbial activity, with the highest values for biomass carbon being observed at doses of 75 and 125 kg ha⁻¹ (345.60 and 327.22 mg kg⁻¹, respectively), due to the higher concentration of C in the soil. The application of silicate fertilizer led to an increase in basal soil respiration (C-CO₂), with the highest C-CO₂ values observed at a dose of 225 kg ha⁻¹ (56.98 mg kg⁻¹), due to the C/N ratio. Silicon had no influence on total organic carbon (TOC), microbial quotient (qMic), easily extractable glomalin and total glomalin. The application of silicate fertilizer led to an increase in the mineralization and metabolic quotients, with the highest qCO₂ values being observed at a dose of 225 kg ha⁻¹ (0.21 mg kg⁻¹) and the highest qMin value being obtained at a dose of 225 kg ha⁻¹ (0.92 mg kg⁻¹). The application of silicate fertilizer led to an increase in the enzymatic activity of alkaline phosphatase, while arylsulphatase and β -glucosidase decreased as the doses increased. The highest doses (225 kg ha⁻¹) were more efficient. Silicon acts on the soil microbiota, influencing microbiological attributes and as a mitigator of biotic and abiotic stresses in plants, promoting an improvement in onion crop productivity.

Keywords: Productivity. Fertilization. *Allium cepa* L. Soil health.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área experimental	29
Figura 2 - Foto da área experimental	30
Figura 3 - Croqui do ensaio de distribuição dos tratamentos.....	31
Figura 4 - Carbono da biomassa microbiana (mg kg^{-1}), respiração basal do solo ($\text{mg kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), quociente metabólico (mg kg^{-1}) e quociente de mineralização (%) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado	38
Figura 5 - Atividade enzimática em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado	41
Figura 6 - Modelo do efeito de aplicação do fertilizante à base de sílica amorfa (ASF).....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas e físicas do solo da área experimental	32
Tabela 2 - Carbono orgânico total (g kg^{-1}) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado.....	36
Tabela 3 - qMic (%) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado.....	39
Tabela 4 - Glomalina facilmente extraível (μ/g) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado.....	39
Tabela 5 - Glomalina total (μ/g) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALP - Fosfatase alcalina
ARS - Arilsulfatase no solo
As - Arsênio
ASF- Fertilizante à base de sílica amorfa
B - Boro
BASF – Baixo São Francisco
BWh - Clima deserto quente
C - Carbono
Ca - Cálcio
CBM - Carbono da biomassa microbiana
C-CO₂- Respiração basal do solo
CE - Condutividade elétrica
CH₄ - Metano
Cmic - Carbono da biomassa microbiana
CO₂ - Dióxido de carbono
COT - Carbono orgânico total
CRA - Capacidade de retenção de água
CTC - Capacidade de troca catiônica
Cu - Cobre
CV- Coeficiente de variação
Fe- Ferro
FMA - Fungos micorrízicos arbusculares
H₂SO₄ - Ácido sulfúrico
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K₂Cr₂O₇ - Dicromato de potássio
K₂SO₄ - Sulfato de potássio
Lsi- Proteína transportadora
MA - Micorrizas arbusculares
Mg - Magnésio
Mn - Manganês
MOS - Matéria orgânica do solo
MUB - Solução estoque de tampão universal modificado

N - Nitrogênio

NaOH - Hidróxido de sódio

NDVI - Índice de vegetação por Diferença Normalizada

NO - Óxido nitroso

P - Fósforo

pH – Potencial hidrogeniônico

PNG - p-nitrofenol- β -D-glicosídeo

PNP - p-nitrofenil fosfato

PNS- p-nitrofenil sulfato

PSB – Bactérias solubilizadoras de fosfato

qCO_2 - Quociente metabólico

$qMic-C$ - Quociente microbiano do carbono

$qMin$ - Quociente de mineralização

S - Enxofre

Se - Selênio

Si - Silício

SiO₂ - Dióxido de silício

TFSA - Terra fina seca ao ar

XR - Xisto retornado

Zn - Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

ha - Hectare

t - Tonelada

kg/ha - Quilograma/hectare

°C - Graus celsius

ml- Mililitros

M - Molar

g - Grama

F - Fator de correção

β - Beta

% - Porcentagem

μ /g - Micrograma por grama

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Hipóteses	16
1.2 Objetivos	16
<i>1.2.1 Objetivo Geral</i>	<i>16</i>
<i>1.2.2 Objetivos Específicos</i>	<i>16</i>
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Cultivo da cebola no Vale do São Francisco	17
2.2 Silício	18
<i>2.2.1 Silício no solo</i>	<i>18</i>
<i>2.2.2 Silício na planta</i>	<i>19</i>
<i>2.2.3 Silício na microbiota do solo</i>	<i>21</i>
2.3 Indicadores microbiológicos de qualidade do solo	23
<i>2.3.1 Biomassa microbiana</i>	<i>23</i>
<i>2.3.2 Respiração basal do solo</i>	<i>24</i>
<i>2.3.3 Quocientes microbiano, metabólico e de mineralização</i>	<i>25</i>
<i>2.3.4 Enzimas do solo</i>	<i>26</i>
<i>2.3.5 Glomalina</i>	<i>27</i>
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Descrição da área e coleta do solo	29
3.2 Carbono Orgânico Total (COT)	32
3.3 Carbono da Biomassa Microbiana	33
3.4 Respiração basal do solo	33
3.5 Quociente metabólico, microbiano e de mineralização	34
3.6 Quantificação da glomalina	34
3.7 Atividade enzimática	34
3.8 Análises Estatísticas	35
4 RESULTADOS	36
4.1 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob o Carbono orgânico total (COT)	36
4.2 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a biomassa microbiana, respiração basal do solo, quociente metabólico, quociente de mineralização e microbiano	36

4.3 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a Glomalina no solo	39
4.4 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a atividade enzimática do solo	40
5 DISCUSSÃO.....	42
5.1 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a biomassa microbiana, respiração basal do solo, quociente metabólico e quociente de mineralização	42
5.2 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a atividade enzimática do solo	46
5.3 Modelo do efeito de aplicação do fertilizante à base de sílica amorfa (ASF)	49
6 CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS.....	51
APÊNDICE A – Fontes, total de nutrientes, adubação de solo e fertirrigação.....	60

1 INTRODUÇÃO

A cebola (*Allium cepa* L.) possui importância alimentícia, medicinal e econômica em todo o mundo. Diante de suas características produtivas e necessidade de manejo do uso da terra para sua produtividade, existe a necessidade de estudos sobre adubação mais eficiente e sustentável. O silício proporciona às plantas tolerância à estresses hídricos, de temperatura, salinidade, resistência às pragas e fungos e melhoria das funções bioquímicas, constituindo uma estratégia sustentável para as plantas e para o solo.

Em ambientes com baixa produtividade, ou escasso de matéria orgânica, como ocorre em regiões semiáridas do nordeste brasileiro, a fertilização assume um papel crucial para atender a essas necessidades. A adubação silicatada atua na mitigação de estresses bióticos e abióticos, influenciando a comunidade microbiana, quando sujeita a diferentes doses de aplicação, resultando na melhoria das condições do solo. Diante disso, os indicadores biológicos, sensíveis às mudanças no uso da terra e práticas de manejo, permitem avaliar a qualidade do solo em ambientes semiáridos. Nesse contexto, entre os parâmetros biológicos utilizados como indicadores de qualidade do solo, destacam-se: A biomassa microbiana que é um atributo sensível às mudanças ambientais, sendo útil para estimar e monitorar a degradação em ambientes semiáridos. A respiração basal do solo ($C-CO_2$) reflete a atividade microbiana, sendo seu aumento indicativo de distúrbios ou equilíbrio ecológico.

A determinação dos quocientes microbianos (q_{Mic}), metabólico (q_{CO_2}) e de mineralização (q_{Min}) oferece informações sobre a atividade microbiana e matéria orgânica na área. As enzimas do solo desempenham papéis cruciais nos processos bioquímicos e na ciclagem de nutrientes, particularmente do C, N, P e S. A atividade das enzimas fosfatase alcalina está relacionada à mineralização do fósforo orgânico e inorgânico, a arilsulfatase possui relação com a clivagem de O ligado ao S e decomposição da matéria orgânica, enquanto que a β -glucosidase está relacionada ao ciclo do C, fornecendo informações sobre a eficiência biológica do solo. A glomalina, uma glicoproteína produzida pelos fungos micorrízicos arbusculares (FMA), melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. O silício proporciona um ambiente mais heterogêneo para o desenvolvimento da comunidade microbiana, favorecendo o aumento da colonização e abundância de população específica no solo que, por sua vez, contribui para riqueza e estabilidade do ambiente microbiano.

Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar os indicadores microbiológicos de qualidade do solo no cultivo de cebola com aplicação de silício no baixo São Francisco, tais

como, a determinação de enzimas fosfatase alcalina, β -glucosidase, arilsulfatase, além da quantificação da glicoproteína glomalina, estimando-se assim, o carbono da biomassa microbiana e a respiração basal do solo, para determinações de quocientes metabólicos, microbianos e de mineralização do solo. Hipotetizou-se que a adubação com silício no cultivo da cebola aumenta a biomassa e a atividade microbiana do solo, tendo em vista diferentes doses de aplicação.

1.1 Hipóteses

A adubação com silício no cultivo da cebola em clima semiárido no Vale do São Francisco aumenta a biomassa e atividade microbiana do solo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a qualidade do solo a partir de indicadores microbiológicos em cultivo de cebola fertilizado com silício no baixo São Francisco.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Quantificar a atividade das enzimas: fosfatase alcalina, β -glucosidase, arilsulfatase e a produção da glicoproteína glomalina em solos sob cultivo de cebola com aplicação de diferentes doses de silício;
- Estimar o carbono da biomassa microbiana e a respiração basal do solo sob cultivo de cebola com aplicação de diferentes doses de silício;
- Determinar os quocientes metabólicos, microbianos e de mineralização do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultivo da cebola no Vale do São Francisco

Em 2022, no que diz respeito à produção agrícola de cebola no Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2023) a quantidade produzida é de 1.656.076 t, com o valor da produção de R\$ 4.107.583,00, área plantada de 48.904 ha, área colhida de 48.895 ha e rendimento médio de 33.870 kg/ha. Dos estados do nordeste, Pernambuco e Bahia são os maiores produtores (IBGE, 2019).

Estudo que analisa a dinâmica de comercialização nos entrepostos públicos de hortigranjeiros, que são fundamentais para o escoamento de produtos in natura no país. A avaliação mensal abrange hortaliças e frutas de maior relevância nas Centrais de Abastecimentos (Ceasas) e que possuem maior peso no Cálculo do índice de inflação oficial, o Índice de preços ao Consumidor Amplo IPCA. A cebola está entre os produtos examinados nesse contexto. Dentre os principais municípios do país em termos de oferta de cebola para (Ceasas) analisadas juntamente com suas microrregiões correspondentes em novembro de 2023, consta em segundo lugar, o município de Petrolina-PE, microrregião (Petrolina-PE) com a quantidade de cebola ofertada de 3.444.480 kg (CONAB, 2023).

A cebola é uma hortaliça sensível ao déficit hídrico, com necessidade de disponibilidade de água no solo e frequência de irrigações para o seu desenvolvimento. Porém, o excesso de água e altas temperaturas são prejudiciais, proporcionando a incidência de patógenos, reduzindo o crescimento, produção e qualidade de bulbos. Sendo assim, o manejo inadequado da cultura gera prejuízos e danos para esta atividade agrícola de grande importância, necessitando de adubação eficiente para sua melhor produtividade (MESQUITA et al., 2017). O Vale do São Francisco, região semiárida do Nordeste do Brasil, apresenta baixa umidade e pluviosidade anual, constituindo-se uma área susceptível à diversos fatores que podem comprometer a produtividade das culturas (SÁ et al., 2021). Desta forma, os fatores descritos constituem um desafio para produtividade das culturas nesta região, necessitando de um manejo adequado para melhoria nas condições do solo.

2.2 Silício

2.2.1 Silício no solo

O silício (Si) é um elemento benéfico que desempenha diversas funções no solo, sendo a segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre depois do oxigênio (ALI et al., 2020; SHAHZAD et al., 2022). Especificamente, na composição da crosta terrestre, o silício corresponde cerca de 27,7% (PONCE et al., 2022). No entanto, em solos tropicais, a maior parte desse silício se encontra em formas indisponíveis para as plantas. Essa abundância de silício na crosta terrestre é originada de várias fontes, como rochas carbonáceas, carbonitos, basaltos, calcários e ortoquartzitos, sendo encontrada na forma de óxido de silício (SiO_2) e outras formas, como quartzo e opala ($\text{SiO}_{2,n} \text{H}_2\text{O}$) (BAKHAT et al., 2018; ATTA et al., 2019). Entretanto, a forma mais comumente encontrada de silício nos solos é de dióxido de silício (SiO_2) (ETESAMI; JEONG; GLICK, 2021).

O silício é reconhecido como um dos principais contribuintes para a formação de argilominerais no processo de gênese do solo (MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015). Contudo, a disponibilidade de Si solúvel para as plantas pode ser limitada em certos solos, principalmente devido ao teor de argila, à mineralogia e à textura do solo (CAMARGO, 2016). Em média, os solos brasileiros contêm de 5 a 40% de silício em sua composição. O óxido de silício, presentes nos argilominerais, confere a ele a posição de elemento mais abundante no solo. Contudo, devido ao intenso processo de intemperismo característico dos solos tropicais, o silício se encontra predominantemente na forma de quartzo e opala ($\text{SiO}_{2,n}\text{H}_2\text{O}$) (MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015).

O silício pode ser encontrado de várias formas na solução do solo, incluindo ácido monomérico (ácido monossilícico), oligomérico, polissilícico. A forma monomérica é facilmente acessível para as plantas (FREW et al., 2018). As propriedades do solo, como textura, potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC), desempenham papel fundamental no controle e destino de elementos na rizosfera do solo (JILLING et al., 2018).

2.2.2 Silício na planta

O silício tem atraído a atenção dos cientistas de plantas em todo o mundo devido ao seu impacto positivo no crescimento e desenvolvimento das plantas. Suas propriedades benéficas são mais notáveis em condições de estresse abiótico e biótico. O silício não é considerado essencial, mas é amplamente reconhecido como elemento benéfico para o crescimento das plantas, possui funções de aumentar a resiliência das plantas e reduzir o estresse. Apesar de ser a segunda substância mais abundante na crosta terrestre, a maioria dos solos precisam de uma forma disponível de silício para as plantas, especificamente o ácido silícico. A absorção de Si é um processo ativo e envolve proteínas transportadoras, como Lsi1, Lsi2, Lsi3 e Lsi6, que operam em locais subcelulares específicos. A cooperação entre esses transportadores facilita a captação e acúmulo de silício pelas plantas (GAUR et al., 2020).

O silício que é fornecido às plantas por meio do solo é assimilado pelas raízes junto com a água, sendo móvel dentro da planta e transportado no sentido do fluxo de transpiração, o que significa que ele se move para cima na parte aérea da planta (BAKHAT et al., 2018). Ocorre o acúmulo na cutícula das plantas, onde desempenha um papel importante na formação de uma barreira protetora contra insetos e doenças. Além disso, a presença do silício no citosol das células das plantas promove a produção de ácido jasmônico, uma substância essencial para a defesa das plantas contra estresses e ameaças bióticas (BAKHAT et al., 2018).

Após a absorção, ocorre o acúmulo de Si nos tecidos epidérmicos, formando uma camada de membrana de celulose, uma camada protetora, desenvolvida quando a pectina e os íons de cálcio estão presentes, favorecendo a absorção e proteção da planta. Esse processo de absorção pelas raízes das plantas é realizado através da transferência da parte aérea ao fluxo de transpiração, acumulando-se e causando a polimerização no sistema intercelular na parte abaxial das cutículas, impedindo a infecção ocasionada por patógenos e prejuízos à planta (BAKHAT et al., 2018).

As principais fontes de aplicação do Silício são por meio da aplicação via fertirrigação, pelos fertilizantes (os silicatos), como, por exemplo, o silicato de cálcio, fontes alternativas como casca de arroz. Sendo assim, é necessário o entendimento dos efeitos fisiológicos do silício na cultura em estudo (CASSEL et al., 2021).

Além dos diversos benefícios do Si, melhora a resistência das plantas à baixa disponibilidade de água, influenciando positivamente a expressão de vários genes relacionados ao estresse, a exemplo do gene Xa21 membro (BHARDWAJ; KAPOOR, 2021).

Estudos demonstraram resultados positivos do silício (Si) no crescimento das plantas, especialmente em condições de estresse, explorando os mecanismos moleculares envolvidos no transporte de Si, com ênfase na descarga e transporte pelo xilema em células que acumulam sílica em níveis elevados, como esclerênquima, fibras, tecidos de armazenamento, epiderme e tecidos vasculares. A deposição de silício em vários tipos de células e tecidos, acompanhado de sua distribuição nos espaços intercelulares, afetando as características morfológicas e fisiológicas das plantas, contribuindo para sua maior resiliência em face de diversos tipos de estresses, tanto bióticos quanto abióticos. A maioria dos benefícios associados ao Si resultam de sua influência em processos fisiológicos, como também, modulação de respostas ao estresse e interações bioquímicas (MANDLIK et al., 2020).

O silício (Si) desempenha várias funções versáteis na promoção do crescimento das plantas, incluindo a melhoria dos aspectos morfológicos, fixação de nitrogênio, rendimento das culturas e, conseqüentemente, promove a produtividade da cultura (MIR et al., 2020). O silício também demonstra capacidade em regular lesões fisiológicas causadas pelo estresse hídrico, tornando-se um elemento importante neste contexto. Além disso, é importante ressaltar que o Si não apresenta efeitos adversos nas cultivares mesmo em doses elevadas. Quando as plantas enfrentam estresse hídrico, seu crescimento e atividade fotossintética são limitados, resultando em alterações no sistema de defesa antioxidante e, conseqüentemente, gera um estresse oxidativo (KAPOOR et al., 2020).

As pesquisas possibilitam a compreensão das funções, importância ecológica e benefícios do Si em plantas cultivadas em ambientes com stress hídrico. Nessa perspectiva, embora seja abundante nas plantas, não foi classificado como nutriente essencial, mas considerado como elemento benéfico para o crescimento, principalmente em ambientes com pouca disponibilidade de água (IMTIAZ et al., 2016).

A aplicação de Si tem sido recomendada para otimizar o crescimento das plantas e a resistência aos estresses ambientais, além de minimizar os desequilíbrios nutricionais, possuem finalidade ecologicamente sustentável (ETESAMI; JEONG; RIZWAN, 2020). Bybordi, Saadat e Zargaripour (2018) avaliaram o efeito da interação de Zeólita, Se e Si, em diferentes doses, qualitativa e quantitativamente, nas características da cebola cultivada em condições salinas, observaram que o número de bulbos de pequeno porte diminuíram, a partir do aumento da aplicação de Zeólita, Se e Si, que de forma geral, resultando em alta produtividade da cebola e características fisiológicas e qualitativas. Para todas as características estudadas, os resultados foram significativos, exceto para nitrogênio do bulbo, sólidos solúveis, sódio e potássio foliar,

atividade da peroxidase e clorofila. Dessa forma, os estudos constataram a importância da interação e benefícios atribuídos à aplicação de Zeólita, Se e Si para a produtividade da cebola.

2.2.3 Silício na microbiota do solo

O microbioma é o local onde uma comunidade diversificada de fungos, bactérias, e arqueias estão presentes ao redor das raízes e no entorno das plantas, podendo ter efeitos variados na saúde e desempenho das plantas, sendo classificados como patogênicos ou benéficos. Para garantir seu crescimento saudável, as plantas monitoram os nichos do solo ao redor de suas raízes, detectando microrganismos parceiros (benéficos), com a função de melhorarem a absorção de nutrientes e estimular o crescimento das plantas. As plantas possuem uma variedade de mecanismos para alterar seu microbioma, incluindo mudanças na estrutura das raízes, liberação de metabólitos secundários e coordenação de várias respostas de defesa (PASCALE et al., 2020).

A rizosfera é o ambiente ao redor das raízes e abriga microrganismos benéficos, incluindo bactérias que solubilizam fosfato (PSB) e microrganismos capazes de fixar nitrogênio (KOUR et al., 2021). No microbioma, existe o componente rizosférico do solo, refere-se a uma zona que sofre influência direta dos exsudatos e secreções liberadas pelas raízes das plantas, além de desempenhar papel fundamental na comunidade microbiana associada às raízes (SANTOS; OLIVARES, 2021). Em relação aos efeitos do Si, na microbiota do solo, este elemento contribui também para a ampliação da comunidade microbiana e estudos demonstram que pode influenciar no aumento da população bacteriana benéfica (LIN et al., 2020).

Das et al. (2021) avaliaram a resposta microbiana do solo com muita disponibilidade de arsênio (As), no cultivo de arroz que recebeu fertilização de silicatos (fertilizantes de silício à base de escória) desenvolveram respostas microbianas ligadas à correção pelos fertilizantes de silicato, além de aumentar a abundância de comunidades funcionais microbianas do solo que são importantes para o crescimento da cultura e controle de As. Os resultados demonstraram que a adição de fertilizantes de silicato otimizou a fertilidade geral do solo, aumentando a abundância de comunidades funcionais microbianas, devido a genes funcionais a exemplo dos genes de degradação de C lábeis, envolvidos na ciclagem de nutrientes, fixação de nitrogênio e carbono, consumo, enquanto diminui o número de microrganismos envolvidos da produção de metano e óxido nitroso.

No estudo em que se analisou o impacto de duas fontes distintas de silício (silicato de K e Na) na comunidade microbiana do solo e da rizosfera da cana-de-açúcar, notou-se que a influência da aplicação de Si na comunidade microbiana foi mais evidente quando se utilizou silicato de Na em comparação com o silicato de K. Especificamente, o silicato de Na causou uma alteração distinta na estrutura da comunidade, contrastando com o silicato de K e o controle sem Si, resultando numa redução significativa na diversidade microbiana tanto no solo quanto na rizosfera, confirmando a hipótese de que diferentes fontes de Si (silicato de Na e K) podem induzir respostas distintas na comunidade microbiana da rizosfera da cana-de-açúcar (LEITE et al., 2024).

A disponibilidade de silício através da fertilização tem o potencial de modular as populações microbianas, incluindo microrganismos benéficos como bactérias solubilizadoras de silicato e fungos micorrízicos. Essas modulações, por sua vez, impactam a ciclagem de nutrientes, a saúde das plantas e, de maneira mais abrangente, o ecossistema do solo (JHONSON et al., 2022; ETESAMI; SCHALLER, 2023; LEITE et al., 2023). As diferenças notáveis entre os dois ambientes estão em grande parte relacionadas à influência da exsudação radicular na rizosfera, desempenhando um papel crucial na formação do recrutamento de grupos microbianos específicos (VIEIRA et al., 2020; MENDES et al., 2019; ZHAO et al., 2020).

Estudos prévios sobre o potencial do silício na rizosfera, indicaram que a fertilização com silicato de sódio resultou em uma alteração na comunidade procariótica em comparação com o controle e silicato de silício (LEITE et al., 2024). O impacto significativo do silicato de sódio na rizosfera pode ser atribuído principalmente à composição deste fertilizante, que contém peptídeos e aminoácidos facilitadores da absorção de silício (BOTTA et al., 2011). Esses compostos também atuam como fontes biológicas de carbono e nitrogênio para microrganismos (BROUGHTON et al., 2015) e são responsáveis por influenciar o desenvolvimento das raízes, a colonização e interações microbianas (MOE, 2013). Dessa forma, os estudos demonstram a influência do silício na estrutura da comunidade microbiana do solo.

2.3 Indicadores microbiológicos de qualidade do solo

A avaliação dos parâmetros microbiológicos possibilita a identificação de estratégias eficazes para o uso sustentável do solo, visando à manutenção de sua qualidade e preservação ambiental (MELLONI et al., 2018). O solo, como um recurso natural vital, desempenha funções essenciais para as funções de suporte à vida e abriga uma microbiota diversa. A microbiota do solo é dinâmica e adapta-se continuamente às mudanças ambientais. Essa microbiota é considerada um indicador sensível para avaliar as alterações que ocorrem no ambiente do solo (MARTINS, 2011; DANTAS et al., 2021).

As comunidades bacterianas presentes no solo são consideradas fundamentais na expressão dos processos físicos e químicos, apresentando destaque como indicadores da função ecológica e fertilidade do solo (MA et al., 2021). Nessa perspectiva, os nutrientes do solo, atividades enzimáticas e comunidades microbianas são considerados importantes indicadores da saúde do solo (MA et al., 2021).

Os atributos/variáveis microbiológicos utilizados como indicadores de qualidade do solo pode ser a biomassa microbiana, a respiração basal do solo, os quocientes microbiano, metabólico e de mineralização do solo, as atividades enzimáticas, e o conteúdo de glomalina são considerados sensíveis às alterações ambientais, oferecendo informações precisas para avaliar os índices de qualidade do solo.

2.3.1 Biomassa microbiana

A biomassa microbiana é formada por bactérias, fungos, archaeas, protozoários e algas (BARBOSA; OLIVEIRA, 2022). A biomassa microbiana está relacionada aos componentes físicos, químicos e funcionamento do solo, e pode influenciar as propriedades do solo (DANTAS et al., 2021). A biomassa microbiana é considerada um excelente indicador de qualidade ambiental, em decorrência da sensibilidade às alterações que ocorrem nos ecossistemas solo e funções benéficas, contribuindo para a estimar e monitorar a degradação em ambientes semiáridos (BARBOSA; OLIVEIRA, 2022).

Nessa perspectiva, segundo Tang et al. (2019) o diagnóstico da qualidade do solo é realizado a partir da comparação das mudanças de indicadores microbianos sensíveis, em que os solos são monitorados ao longo do tempo. Sendo assim, os solos com maior atividade

microbiana apresentam melhores funções, ou seja, melhor qualidade. Baseado nisso, o diagnóstico ou determinação destes indicadores apresentam diversas vantagens, como:

1) os microrganismos são cruciais, possuem inúmeras funções e são abundantes no solo (FENG et al., 2018); 2) além de abundantes, estão relacionados à fertilidade do solo (SONG et al., 2017).

O estudo que investigou o impacto dos íons de sal na composição elementar das plantas e explorou o papel do silício (Si) no acúmulo de carbono da biomassa em espécies de pastagens *in situ*. Nas amostras das margens de lagos salgados, observou-se que diferentes distâncias da costa resultaram em fitocenoses distintas, halófitas e gramíneas moderadamente tolerantes ao sal, correlacionadas com variações nas propriedades do solo. A salinidade variável nas plantas teve efeitos adversos no teor de carbono das plantas, reduzindo de 53,9% para 29,2% com o aumento da salinidade. O armazenamento de Si nas plantas e o teor de Si nas plantas mostraram correlação positiva com o Si biodisponível nos solos. Apesar da correlação negativa entre o teor de C nas plantas e os fitólitos, o acúmulo de C na biomassa aumentou devido ao aumento do armazenamento de Si nas plantas. O carbono ocluído por fitólitos vegetais (PhytOC) também aumentou com o aumento do teor de Si em gramíneas moderadamente tolerantes ao sal, indicando o potencial do Si na mediação da salinidade das plantas e na assimilação de C. Esses resultados fornecem respostas valiosas para a manipulação potencial do sequestro de C a longo prazo em pastagens dominadas por acumuladores de Si (LIU et al., 2020).

2.3.2 Respiração basal do solo

A respiração basal do solo (C-CO₂) indica a atividade microbiana no solo, utilizada como indicador de qualidade no monitoramento da degradação. Este parâmetro necessita de análise contextual para interpretação dos resultados. O aumento das taxas de C-CO₂ pode caracterizar tanto distúrbio quanto equilíbrio ecológico, ressaltando que seu uso não pode ser feito de forma isolada. Em decorrência de sua característica dualística, a atividade microbiana é considerada como um dos parâmetros mais sensíveis em relação às alterações ambientais (BARBOSA; OLIVEIRA, 2022).

Estudos sobre áreas degradadas corroboram para o pressuposto de que nestes ambientes em processo de degradação, este atributo possui baixos índices, caso não ocorra a decomposição de matéria orgânica disponível em agregados (BARBOSA; OLIVEIRA, 2022).

Estudos recentes destacam a relevância do silício (Si) na decomposição da turfa, especialmente em pântanos minerotróficos, onde grandes quantidades de Si biogênico são encontradas. A influência do Si na produção de gases de efeito estufa foi investigada em experimentos de incubação com matéria orgânica de turfa em diferentes condições redox. Os resultados indicam que o Si pode mobilizar fósforo (P) de minerais de ferro (Fe), aumentando a atividade microbiana e resultando em maiores taxas de produção de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). A adição de Si em material previamente oxidado aumentou as concentrações de P na água dos poros e promoveu uma maior produção de CO₂. Além disso, a metanogênese foi mais intensa com a adição de Si, sugerindo um esgotamento mais rápido dos aceitadores de elétrons devido às taxas de respiração aceleradas. Houve maior disponibilidade de fósforo e estímulo da atividade microbiana, devido ao efeito direto Si (HÖMBERG et al., 2021).

2.3.3 Quocientes microbiano, metabólico e de mineralização

A determinação dos quocientes microbianos (q_{MIC}), metabólico (q_{CO_2}) e de mineralização (q_{Min}) faz-se por meio do carbono orgânico total (COT) do solo, do C_{mic} e da $C-CO_2$. São utilizados com a finalidade de monitorar a degradação e indicar a qualidade do solo. A relação de baixos valores desses parâmetros, indicam baixa atividade microbiana, qualidade inferior da matéria orgânica e baixa reserva de compostos orgânicos na área, estas características são mais comumente encontradas em áreas degradadas (BARBOSA; OLIVEIRA, 2022).

Estudo que avaliou os efeitos da aplicação de doses crescentes de xisto retornado (XR) nas características biológicas indicadoras da qualidade do solo, especialmente em Argissolo Vermelho distrófico arsênico, em condições de laboratório e campo, envolveram a aplicação de diferentes doses de XR, variando de 0 a 3.000 kg ha⁻¹. Os resultados indicaram melhorias na atividade microbiológica do solo com doses crescentes de XR, evidenciadas pela redução na emissão de CO₂, sem alterações no carbono da biomassa microbiana (CBM) e sem impactos negativos na atividade enzimática do solo. Os dados obtidos, incluindo resultados de enzimas em condições de campo, CBM, quociente metabólico (q_{CO_2}) e teste ecotoxicológico em laboratório após duas aplicações de XR, sugerem que o uso desse material não resulta em degradação biológica do solo (DOUMER et al., 2011).

2.3.4 Enzimas do solo

As enzimas do solo participam dos processos bioquímicos e possuem relação com a ciclagem de nutrientes, principalmente na ciclagem de C, N, P e S. Algumas enzimas são utilizadas como bioindicadores para mudanças no ambiente. Neste contexto, a escolha de uma enzima para ambiente específico ficou restrita a criação de tecnologias de bioindicadores enzimáticos (YANG et al., 2016).

As enzimas desempenham funções bioquímicas fundamentais no processo geral de decomposição da matéria orgânica no sistema do solo, catalisando reações importantes para os processos vitais dos microrganismos do solo. Regulam o ecossistema e desempenham funções bioquímicas relacionadas à transformação da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes do solo. A atividade enzimática consiste em várias enzimas intracelulares e extracelulares originadas de microrganismos, incluem: amilase, arilsulfatases, glucosidase, celulase, quitinas, desidrogenase, fosfatase, protease e urease (SHERENE, 2017).

As fosfatases são consideradas um grupo importante de enzimas que catalisam a hidrólise de ésteres e anidridos de ácido fosfórico. A arilsulfatase é relacionada a clivagem de O ligado ao S e possui importante contribuição para a mineralização de éster em solos, consideradas importantes na decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (SHERENE, 2017). A enzima β -glucosidase do ciclo do carbono, sua atividade é afetada pela qualidade e quantidade dos resíduos da colheita do solo, pelos tipos e quantidades de fertilizantes orgânicos e inorgânicos aplicados, pela reação e temperatura do solo, bem como pelas práticas de manejo, incluindo o cultivo. A medição dessa atividade fornece informações cruciais sobre a eficiência biológica do solo (TIWARI et al., 2019).

Desta forma, as enzimas consistem em indicadores precisos que respondem rapidamente aos manejos no solo. A interpretação das variações na quantidade das enzimas acontece por meio da correlação da atividade enzimática com parâmetros do solo, a exemplo do carbono do solo, seja pelo aumento ou diminuição, influenciando na atuação das enzimas presentes no solo (BORASE et al., 2020).

Os microrganismos atuam em processos relacionados à gênese, decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, caracterizados por ser a parte com vida do solo, os resultados das análises das enzimas refletem a qualidade, atividade e escolha da enzima para o estudo do solo (NOGUEIROL et al., 2013).

Estudo descreve a influência do silício (Si) na atividade enzimática e na resposta de duas cultivares de arroz à deficiência hídrica. As sementes foram tratadas com dietholato e submetidas a três condições de solo (50% e 100% da capacidade de retenção de água do solo (CRA) e submersão completa em lâmina d'água de 5,0 cm). Duas cultivares (IRGA 424 RI e Guri INTA CL), duas fontes de Si (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio), e quatro doses de Si (0; 4,0; 8,0 e 16 g L⁻¹) foram consideradas. O aumento nas doses de Si resultou no aumento de clorofila, área foliar, massa seca da parte aérea e das raízes, independentemente do regime hídrico do solo. Além disso, observou-se aumento na atividade enzimática e redução da peroxidação lipídica causada pela deficiência hídrica. Conclui-se que o Si mitigou efetivamente o estresse hídrico em plantas de arroz emergentes de sementes tratadas com dietholato (CASSOL et al., 2020).

2.3.5 Glomalina

A glomalina é uma glicoproteína produzida pelos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) é substância pegajosa, favorece a formação de agregados do solo, funcionando como um agente de ligação por unir partículas do solo e da matéria orgânica. Melhora as propriedades físicas, a exemplo da densidade do solo, porosidade, capacidade de retenção de água, controle da erosão solo através da redução de perdas de escoamento do solo (SINGH et al., 2022). Quanto maior a quantidade de glomalina no solo, maior será a biomassa, atividade microbiana e melhoria da atividade catabólica microbiana (SINGH et al., 2022).

As plantas desenvolvem interações bióticas com os FMA, microrganismos mais comuns do solo, conhecidos por reduzir a deficiência de P nas plantas e auxiliar em seu crescimento. Sendo assim, possuem mecanismos para aumentar a absorção de nutrientes por meio do aumento da área de absorção das raízes, liberando substâncias químicas e glomalina (ETESAMI; JEONG; GLICK, 2021).

A glomalina exerce diversas funções no solo, melhorando as propriedades físicas, químicas e biológicas, sequestro de carbono e fonte de nutrientes para as plantas (SINGH et al., 2022). Sendo assim, a utilização da glomalina como parâmetro microbiológico é importante para o melhoramento e entendimento das funções associadas ao solo. A utilização da glomalina como parâmetro microbiológico é importante para o melhoramento e entendimento das funções associadas ao solo.

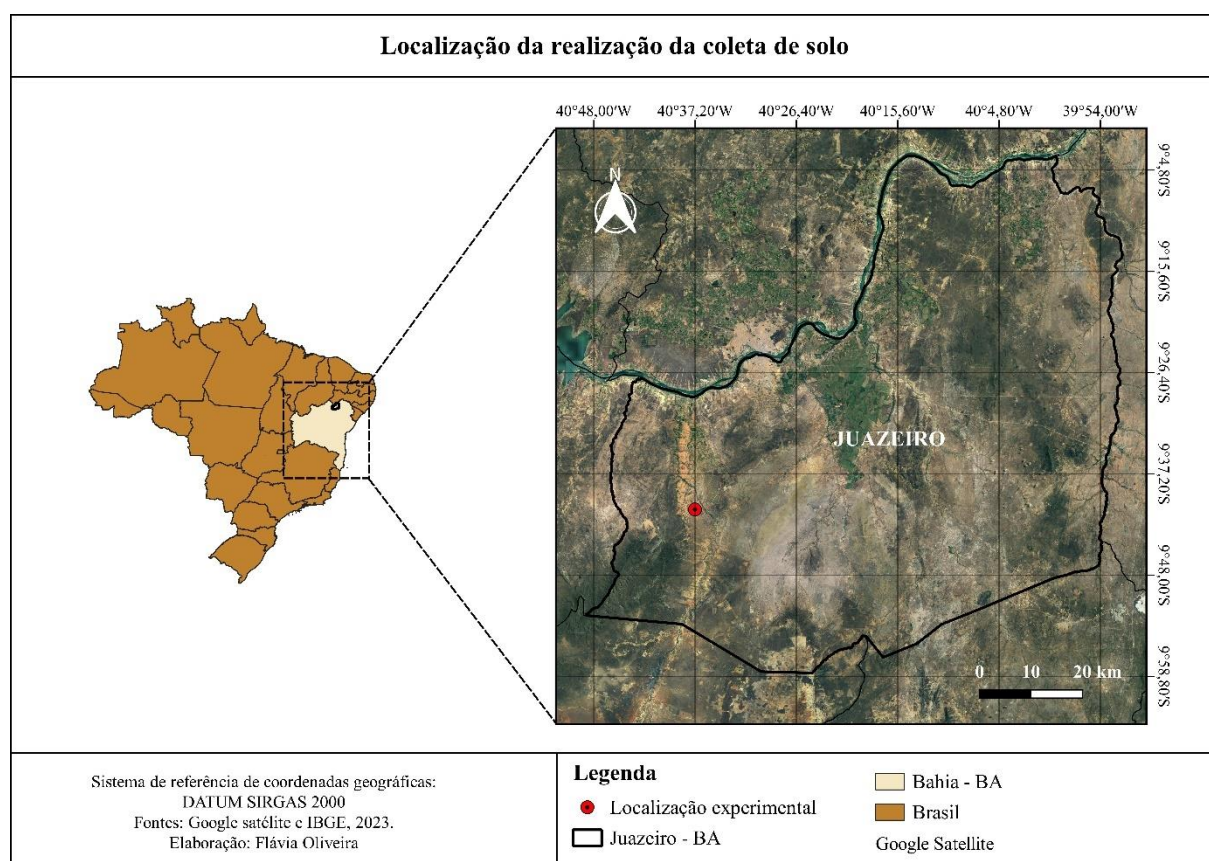
O estudo sobre os efeitos do silício (Si) e das espécies micorrízicas, *Claroideoglomus etunicatum*- M1 e *Rhizoglomus intraradices*- M2, investigou seus efeitos na atenuação da toxicidade de arsênio (AsV e AsIII) em feijão bóer [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]. Tanto o Si quanto as micorrizas arbusculares (MA) apresentaram potencial para conferir tolerância ao estresse (BHALLA; BISHT; GARG, 2023). A presença de arsênio reduziu a simbiose micorrízica, a disponibilidade de nutrientes e a biomassa vegetal, induzindo estresse oxidativo (BHALLA; BISHT; GARG, 2023). As inoculações de Si e micorrizas arbusculares-MA reduziram a absorção de metalóides e a geração de espécies reativas, com benefícios mais pronunciados em M2, seguido por Si e depois M1 (BHALLA; BISHT; GARG, 2023). A eficiência superior do M2 foi associada à sua capacidade de colonização, produção de glomalina e aumento da absorção de nutrientes por meio da modulação das atividades das enzimas do solo (fosfatase alcalina- ALP e arilsulfatase-aril-S) (BHALLA; BISHT; GARG, 2023). A combinação de +Si+2 proporcionou uma tolerância significativamente maior ao arsênio, revelando uma complementaridade funcional entre essas alterações. O estudo destaca a introdução de Si e MA na rizosfera como uma estratégia promissora para induzir tolerância ao arsênio no feijão bóer (BHALLA; BISHT; GARG, 2023).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área e coleta do solo

O experimento foi conduzido na fazenda denominada AM Frutas, localizada em Juazeiro-BA, nordeste do Brasil (Figura 1) e conforme foto da área experimental (Figura 2). A seleção da área foi realizada levando em consideração a textura arenosa do solo, baixos valores de CTC e Si, fatores que intensificam as respostas das culturas ao utilizarem o Si (NASCIMENTO et al., 2023). A região apresenta o clima árido quente (BWh) conforme descreve a classificação climática de Köppen.

Figura 1 - Localização da área experimental



Fonte: Google Satélite e IBGE (2022).

Figura 2 - Foto da área experimental

Fonte: Nascimento (2023).

A caracterização da área experimental foi realizada com a coleta de 30 amostras simples para formar 1 composta. A amostra foi preparada TFSA e armazenada à temperatura ambiente.

O experimento foi semeado em 24 de junho de 2021 e colhido em 06 de outubro de 2021. O plantio da cebola (híbrido NUM 1205 - Baixo São Francisco - BASF) foi realizado por semeadura direta com população de 1 milhão de plantas por hectare.

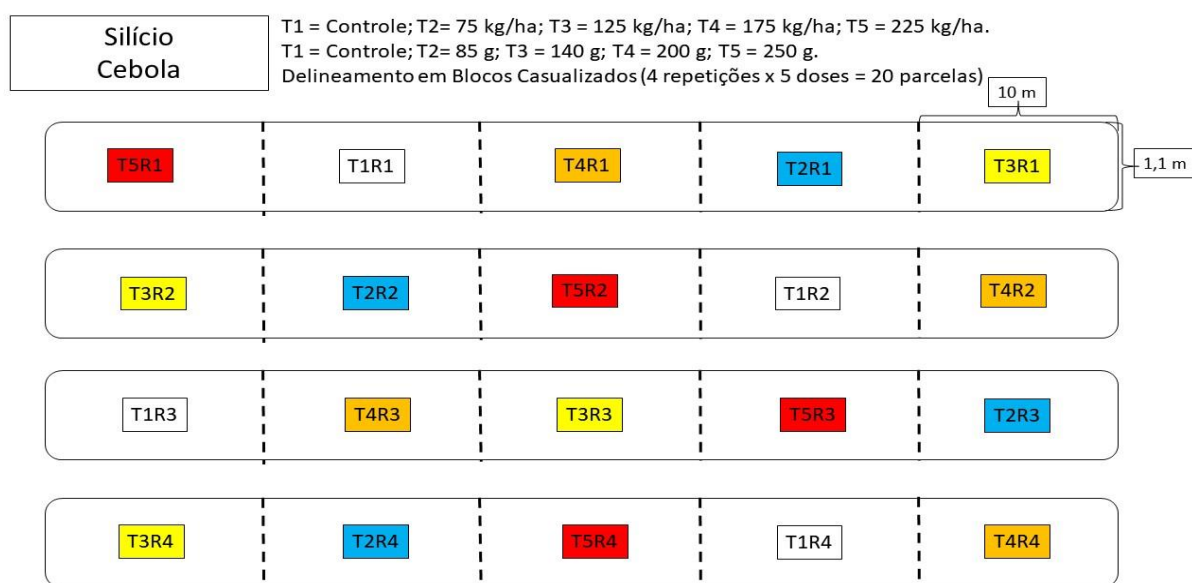
A adubação seguiu o programa adotado na fazenda (Apêndice A), aplicou-se uma adubação de fundação com 302 kg ha^{-1} N e 157 kg ha^{-1} P, 364 kg ha^{-1} K, 46 kg ha^{-1} Ca, 30 kg ha^{-1} Mg, seguindo a recomendação do consultor da fazenda e a água fornecida às plantas foi realizada por meio de irrigação por gotejamento (NASCIMENTO et al., 2023).

O fertilizante aplicado foi à base de sílica amorfa (ASF). O fertilizante comercial silicatado utilizado (Agrisilica®, Agripower Australia Limited) é terra diatomácea natural da espécie *Melosira granulata* e apresenta composição de SiO_2 (52%), cálcio (2%), magnésio (1%) e ferro (1%) na forma de grânulos (tamanho de 2 a 5mm), aplicado a lanço quando as mudas estavam com 8 dias de idade, mediante 5 tratamentos com as doses de 0 (testemunha), 75,

125, 175 e 225 kg ha⁻¹, com quatro repetições, em 20 parcelas experimentais de 10 m² (10 m x 1 m) cada (NASCIMENTO et al., 2023).

A distância entre as parcelas adjacentes foi de 0,5 m (NASCIMENTO et al., 2023). O ensaio foi estabelecido como um desenho de blocos completos aleatorizados e os tratamentos foram atribuídos a cada parcela dentro de cada bloco aleatoriamente, conforme descrito abaixo, no croqui do ensaio de distribuição dos tratamentos (Figura 3).

Figura 3 - Croqui do ensaio de distribuição dos tratamentos



A coleta das amostras de solo foi realizada na camada de 0-20 cm de profundidade, antes para caracterização e depois da instalação do experimento, no momento da colheita. Não foi realizada a classificação do solo. O solo coletado da área experimental foi analisado quanto as características químicas e físicas (Tabela 1) utilizando métodos padrão, conforme (NASCIMENTO et al., 2023).

Tabela 1 - Características químicas e físicas do solo da área experimental

pH	(Água 1:2.5)	5.98
Ca ²⁺	mmol _c kg ⁻¹	89.4
Mg ²⁺	mmol _c kg ⁻¹	14.7
K ⁺	mmol _c kg ⁻¹	6.2
Na ⁺	mmol _c kg ⁻¹	1.0
Al ³⁺	mmol _c kg ⁻¹	0.0
H ⁺ + Al ³⁺	mmol _c kg ⁻¹	10.1
SB	mmol _c kg ⁻¹	95.5
CTC	mmol _c kg ⁻¹	99.5
P	mg kg ⁻¹	43.7
COS	g kg ⁻¹	5.16
MOS	g kg ⁻¹	8.90
Si _a	mg kg ⁻¹	4.3
Si _c	mg kg ⁻¹	2.2
Areia	g kg ⁻¹	570.0
Silte	g kg ⁻¹	80.0
Argila	g kg ⁻¹	350.0

SB soma de bases; CTC Capacidade de troca de cátion; SOC carbono orgânico do solo; SOM matéria orgânica do solo; Si_a silício disponível no solo extraído com ácido acético 0,5 mol L⁻¹; Si_c silício disponível no solo extraído com CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹

Quanto a coleta das amostras de solo para as análises microbiológicas foi realizada no momento da colheita do experimento, em toda a parcela de forma aleatória, contabilizaram 4 amostras simples para 1 composta coletada por parcela. O procedimento realizado na coleta foi a técnica de tradagem, a 20 cm de profundidade, ensacamento de amostras, coletadas em 3 pontos de repetições biológicas, dos quais geraram amostras compostas e armazenamento a -20 cm. Posteriormente, as amostras foram destinadas ao laboratório de microbiologia e mantidas sob refrigeração até o momento das análises.

3.2 Carbono Orgânico Total (COT)

A determinação do carbono orgânico total (COT) foi realizada pelo método de Walkley-Black (FONTURA; CAMPOS, 2017), por combustão líquida de amostras digeridas em meio ácido.

3.3 Carbono da Biomassa Microbiana

A determinação de Carbono da biomassa microbiana (C-mic) foi realizada de acordo com Mendonça e Matos (2005). O método de irradiação-extração, do qual utiliza a energia eletromagnética originada de forno micro-ondas. A determinação do carbono acontece por meio da diferença entre amostras irradiadas das amostras não irradiadas. Para a extração do C-mic foram pesados 20 g de Terra fina seca ao ar (TFSA) de cada amostra de solo em Erlenmeyer. Para o ajuste das umidades dos solos foi utilizado o fator de correção (F). Para determinação do teor de umidade foram pesados 5 g de cada amostra de solo, posteriormente, as amostras foram colocadas em placas de petri e conduzidas à estufa em temperatura de 105°C por 24 horas.

As amostras foram identificadas e separadas. As amostras destinadas à irradiação foram submetidas à 3 min de irradiação em forno micro-ondas, onde após 1min e 30 segundos foi retirada do forno, homogeneizada e posteriormente inserida por mais 1min e 30 segundos.

A extração de C-mic foi realizada com a adição de 80 ml da solução extratora de sulfato de potássio 0,5 M (K_2SO_4), deixando por 30 min em agitador horizontal. A determinação do C-mic ocorreu a partir da adição de 10 ml do extrato filtrado em um Erlenmeyer de 125 ml e adicionado 2 ml de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) 0,066 M e acrescentado 10 ml ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Após esfriar foi adicionado 50 ml de água destilada. Posteriormente, adicionado 4 gotas da solução indicadora de ferroin para titular o dicromato com sulfato ferroso amoniacal 0,03 M.

3.4 Respiração basal do solo

A respiração basal do solo (C-CO₂) foi estimada por meio do método de absorção alcalina (Mendonça e Matos,2005). O método que consiste em estimar o dióxido de carbono liberado na respiração microbiana. A análise foi realizada de cada amostra de solo, onde foram pesadas 50 g de solo (TFSA) e adicionado em recipientes plásticos identificados, acompanhado de copinho com 20 ml de solução de Hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 M, posteriormente fechado o recipiente com o conjunto solo e solução de NaOH para incubação durante 5 dias. Após a incubação foi realizada a determinação. A titulação foi realizada com ácido clorídrico 0,25 M até o desaparecimento da coloração rósea, com a utilização de 3 gotas do indicador fenoftaleína a 1%.

3.5 Quociente metabólico, microbiano e de mineralização

O quociente metabólico do solo (qCO_2) foi determinado pela razão entre respiração basal do solo (C-CO₂) e C-mic (ANDERSON; DOMSCH, 1993). O quociente microbiano do C ($qMic-C$) foi determinado pela razão entre Cmic e o COT (BINI et al., 2014). O quociente de mineralização do carbono ($qMin$) foi determinado por meio da razão entre C-CO₂ e Carbono orgânico total do solo (COT) (SHARMA; SINGH; SODHI, 2020).

3.6 Quantificação da glomalina

A extração e quantificação da glomalina foi realizada de acordo com Wright e Upadhyaya (1996) e Wright e Upadhyaya (1998) por meio do método de Bradford (1976). A extração da glomalina facilmente extraível foi feita a partir 1 g de TFSA em 8 ml de citrato de sódio a 20 mM com pH=7, através de digestão única na autoclave, em temperatura de 121° C, durante 30 minutos. Para determinação da glomalina facilmente extraível foi empregada a técnica de colorimetria, por meio da curva padrão ($y = 0,102x + 0,2337$; $R^2 = 0,991$) e obtidos os teores em µg de glomalina por g⁻¹ solo. Para a fração glomalina total foram realizadas 10 digestões consecutivas, em temperatura de 121° C, o extrator utilizado foi o citrato de sódio a 50 mM com pH=8,0, sob as mesmas condições de digestão. A determinação foi realizada por meio de colorimetria, utilizando a curva padrão ($y = 0,1082x + 0,2521$; $R^2 = 0,99$) e obtidos os teores em µg glomalina g⁻¹ solo.

3.7 Atividade enzimática

As enzimas foram selecionadas com base em sua relevância nos ciclos do C (β-glucosidase), S (arilsulfatase) e P (fosfatase alcalina). A atividade da enzima β-glucosidase foi determinada com 0,05 M de p-nitrofenol-β-D-glicosídeo (p-nitrofenol-β-D-glicosídeo - PNG 0,05 M) após um período de 60 minutos de incubação e o p-nitrofenol liberado foi extraído com Tris (hidroximetil) aminometano (THAM 0,1M, pH 12) (TABATABAI, 1994). A atividade da enzima arilsulfatase foi determinada com 0,05 M da solução de p-nitrofenil sulfato (PNS 0,05), tolueno e tampão acetato (0,5 M, pH 5,8) após um período de 60 minutos de incubação (TABATABAI, 1994). A atividade da enzima fosfatase alcalina foi determinada por

espectrofotometria (420 nm) de p-nitrofenol liberado de 1 g de solo após incubação por 60 minutos a 37° C com solução de p-nitrofenil fosfato de sódio (PNP 0,05 M) em 4 ml de solução estoque de tampão universal modificado MUB (pH 11) (TABATABAI; BREMNER, 1969).

3.8 Análises Estatísticas

O experimento foi delineado em blocos completos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições, totalizando 20 unidades experimentais. A distribuição normal dos resíduos foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk's ($p > 0,05$), e os valores residuais inferiores a -3 e superiores a +3 foram considerados *outliers*, utilizando o software *SAS On Demand for Academics*. Os dados foram submetidos à ANOVA e as médias comparadas pelo teste de Tukey a um nível de significância de 5%, utilizando o programa SISVAR (versão 5.6).

4 RESULTADOS

4.1 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob o Carbono orgânico total (COT)

Não foram observadas diferenças significativas no Carbono orgânico total ($p>0,05$), independente da dose de ASF aplicada (Tabela 2).

Tabela 2 - Carbono orgânico total (g kg^{-1}) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado

Dose (kg ha^{-1})	Médias	Probabilidade
	ASF	Pr>Fc
0	6,16	
75	6,72	
125	5,72	
175	6,48	
225	6,25	
Tratamento	-	0,440
CV (%)	11,85	-

As médias não diferem entre si pelo teste de tukey à 5%. CV= coeficiente de variação. COT= Carbono orgânico do total. Cultura da cebola. Fertilizante à base de sílica amorfa= ASF. Localização da coleta de solo: AM Frutas. Juazeiro-BA. Clima árido quente (BWh).

4.2 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a biomassa microbiana, respiração basal do solo, quociente metabólico, quociente de mineralização e microbiano

As doses de 75,125,175 e 225 do fertilizante ASF ao solo promoveram os percentuais de 42,49, 34,91, 13,38 e 0,41% (Figura 4A) em relação ao controle, respectivamente, para os teores de carbono da biomassa microbiana (Cmic). Os maiores valores foram observados nas doses de 75 e 125 kg ha^{-1} (345,60 e 327,22 mg kg^{-1} , respectivamente), quando comparados a dose zero, na qual não houve aplicação do ASF. Ao comparar a dose de 75 kg ha^{-1} de ASF, que apresentou maior média, com a dose 125 kg ha^{-1} e 175 kg ha^{-1} promoveram respectivamente aumento de 5,32 e 20,43%. O Cmic tendeu a diminuir com o aumento das doses de ASF

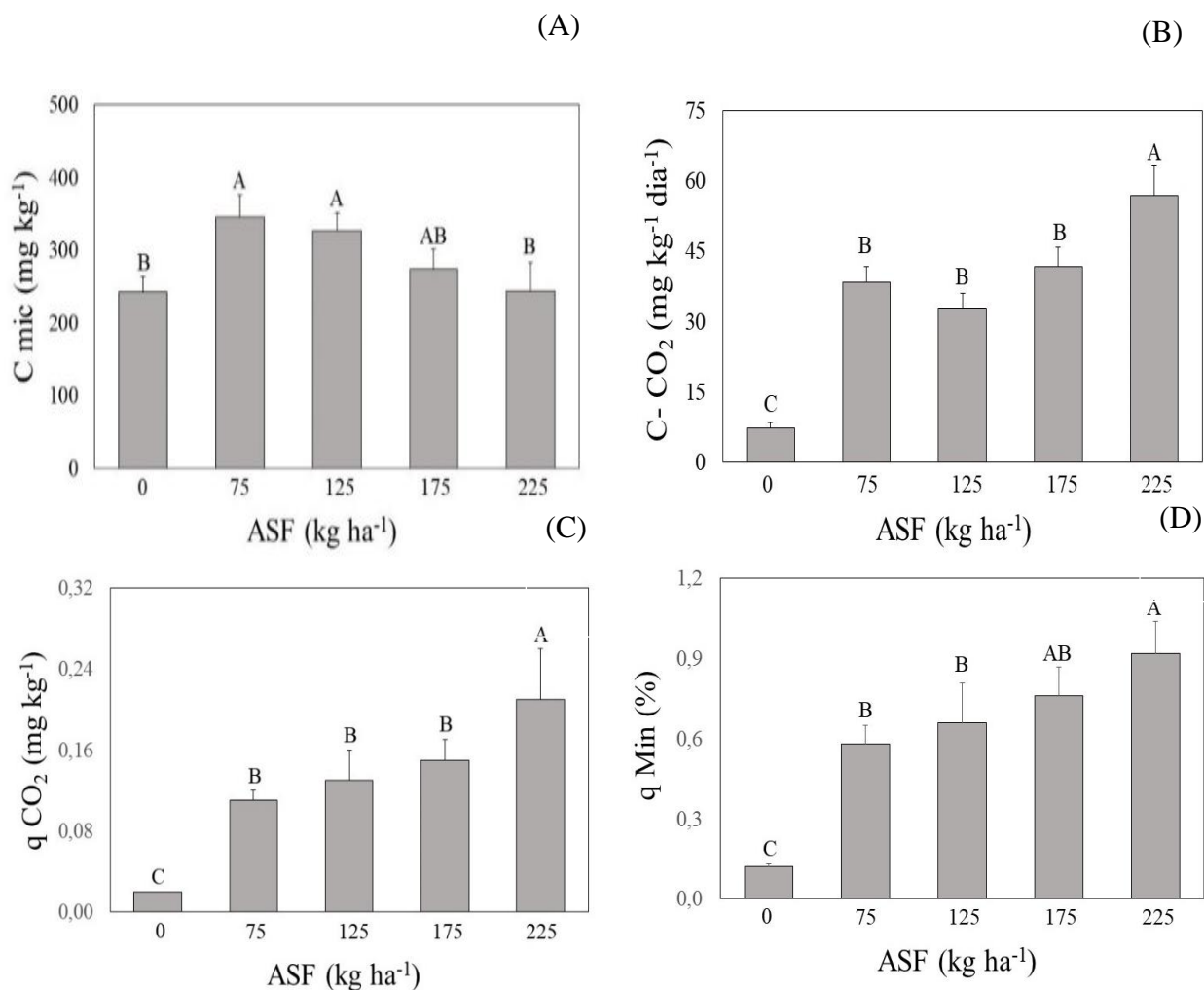
aplicadas ao solo, alcançando na dose mais elevada (225 kg ha^{-1}), o valor de $243,53 \text{ mg kg}^{-1}$, sendo esse $0,41\%$, estatisticamente iguais ao controle.

Na respiração basal do solo foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$). As doses de 75, 125, 175 e 225 do fertilizante ASF ao solo promoveram os percentuais aproximados de 418, 344, 464 e 671% (Figura 4B) em relação ao controle, respectivamente. Os maiores valores foram observados na dose 225 kg ha^{-1} ($56,98 \text{ mg kg}^{-1}$), sendo essa 7 vezes maior que o tratamento controle.

No quociente metabólico foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$). As doses de 75, 125, 175 e 225 do fertilizante ASF ao solo promoveram aumento de 450, 550, 650 e 950,00 % (Figura 4C) em relação ao controle, respectivamente. O $q\text{CO}_2$ apresentou aumento gradual com a aplicação das doses.

No quociente de mineralização foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$). As doses de 75, 125, 175 e 225 do fertilizante ASF ao solo promoveram aumento de 383, 450, 533 e 666,67% (Figura 4D), respectivamente, em relação ao controle. O quociente de mineralização tendeu a aumentar com a aplicação das doses de ASF e quando comparadas as doses observou-se que o maior valor de $q\text{Min}$ foi obtido na dose 225 kg ha^{-1} ($0,92 \text{ mg kg}^{-1}$).

Figura 4 - Carbono da biomassa microbiana (mg kg^{-1}), respiração basal do solo ($\text{mg kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), quociente metabólico (mg kg^{-1}) e quociente de mineralização (%) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado



(A) Carbono da biomassa microbiana (C_{mic}); (B) Respiração basal do solo (C-CO₂); (C) Quociente Metabólico (qCO₂); (D) Quociente de mineralização (qMin). As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão.

O quociente microbiano (qMic) não apresentou diferença significativa ($p > 0,05$), independente das doses aplicadas (Tabela 3).

Tabela 3 - qMic (%) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado

Dose (kg ha ⁻¹)	Médias	Probabilidade
	ASF	Pr>Fc
0	5,42	
75	5,79	
125	4,84	
175	5,53	
225	5,13	
Tratamento	-	0,326
CV (%)	12,04	-

As médias não diferem entre si pelo teste de tukey à 5%. CV= coeficiente de variação. qMic=quociente microbiano. Cultura da cebola. Fertilizante à base de sílica amorfa= ASF. Localização da coleta de solo: AM Frutas. Juazeiro-BA. Clima árido quente (BWh).

4.3 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a Glomalina no solo

Os resultados encontrados demonstraram que não foram observadas diferenças significativas para o teor de glomalina facilmente extraível (Tabela 4) e total (Tabela 5), independente da dose de ASF aplicada.

Tabela 4 - Glomalina facilmente extraível (µ/g) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado

Dose (kg ha ⁻¹)	Médias	Probabilidade
	ASF	Pr>Fc
0	0,29	
75	0,29	
125	0,29	
175	0,28	
225	0,28	
Tratamento	-	0,053
CV (%)	1,84	-

As médias não diferem entre si pelo teste de tukey à 5%. CV= coeficiente de variação. Cultura da cebola. Fertilizante à base de sílica amorfa= ASF. Localização da coleta de solo: AM Frutas. Juazeiro-BA. Clima árido quente (BWh).

Tabela 5 - Glomalina total (μg) em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado

Dose (kg ha^{-1})	Médias	Probabilidade
	ASF	Pr>Fc
0	0,32	
75	0,32	
125	0,32	
175	0,32	
225	0,32	
Tratamento	-	0,000
CV (%)	0,00	-

As médias não diferem entre si pelo teste de tukey à 5%. CV= coeficiente de variação. Cultura da cebola. Fertilizante à base de sílica amorfa= ASF. Localização da coleta de solo: AM Frutas. Juazeiro-BA. Clima árido quente (BWh).

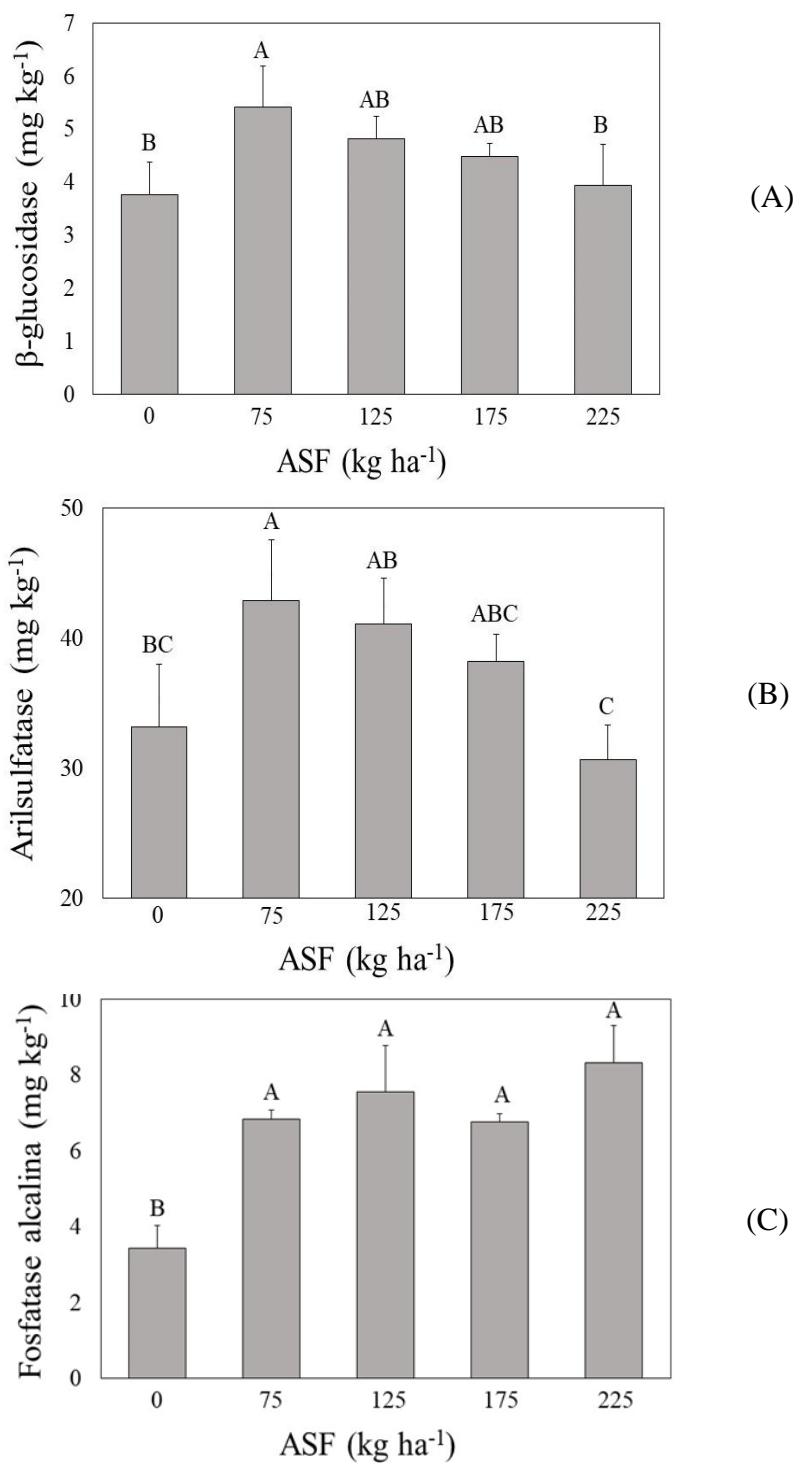
4.4 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a atividade enzimática do solo

Foram observadas diferenças significativas na atividade da enzima β -glucosidase ($p<0,05$). Os maiores teores de β -glucosidase foram encontrados quando aplicada a dose de 75 kg ha^{-1} , sendo ele $5,42 \text{ mg kg}^{-1}$, correspondendo a 44,15%, quando comparado com o tratamento no qual não houve a aplicação do ASF (Figura 5A). Quando comparado o efeito da dose mais elevada de ASF sobre a β -glucosidase foram observadas reduções significativas, sendo ela $3,93 \text{ mg kg}^{-1}$, correspondendo a 4,52% para a dose de 225 kg ha^{-1} , em comparação com a dose zero, na qual não houve a aplicação do ASF.

Foram observadas diferenças significativas na atividade da enzima arilsulfatase ($p<0,05$). A arilsulfatase apresentou comportamento análogo à enzima β -glucosidase. Quando aplicada a dose de 75 kg ha^{-1} foram encontrados os maiores teores, sendo ele $42,88 \text{ mg kg}^{-1}$, correspondendo a 29,20%, quando comparado com o tratamento no qual não houve a aplicação do ASF (Figura 5B). O comportamento estendeu-se quando comparado o efeito da aplicação da dose mais elevada de ASF sobre a arilsulfatase, ocorreram reduções significativas, sendo ela $30,62 \text{ mg kg}^{-1}$, correspondendo a 7,74% para a dose de 225 kg ha^{-1} , em comparação com a dose zero, na qual não houve a aplicação do ASF.

Foram observadas diferenças significativas na atividade da enzima fosfatase alcalina ($p<0,05$). Quando comparado os maiores teores e o efeito da dose mais elevada de ASF sobre a fosfatase alcalina foi observado que a aplicação da dose de 225 kg ha^{-1} , sendo ele $8,31 \text{ mg kg}^{-1}$, correspondendo a 142,98%, promoveu aumento significativo, quando comparado com o tratamento no qual não houve a aplicação do ASF (Figura 5C).

Figura 5 - Atividade enzimática em solo cultivado com cebola sob diferentes doses de fertilizante silicatado



(A) β-glucosidase; (B) Arilsulfatase; (C) Fosfatase alcalina. As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. As barras de erro correspondem ao desvio padrão.

5 DISCUSSÃO

Os resultados demonstraram o efeito da aplicação do fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) e as doses que promoveram maior efeito sob os indicadores avaliados. A partir disso, constatou-se que não houve estatisticamente diferença significativa na concentração do carbono orgânico total do solo (COT), do quociente microbiano (qMic) e nos teores de glomalina facilmente extraível e total, independente da dose de ASF aplicada. O carbono da biomassa microbiana (Cmic) apresentou aumento, apenas nas doses 75 e 125 kg ha⁻¹ em relação ao controle. Na respiração basal do solo (C-CO₂) foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) e os maiores valores foram observados na dose 225 kg ha⁻¹.

No quociente metabólico (qCO₂) e quociente de mineralização (qMin) foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$), apresentaram aumento gradual com a aplicação das doses e observou-se que seus maiores valores foram obtidos na dose 225 kg ha⁻¹ em relação ao controle. Na atividade das enzimas β -glucosidase e arilsulfatase ($p < 0,05$) foram observadas diferenças significativas e os maiores teores foram encontrados quando aplicada a dose de 75 kg ha⁻¹. Na atividade da enzima fosfatase alcalina ($p < 0,05$), quando comparado o efeito das doses, não apresentou diferença entre os tratamentos.

5.1 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a biomassa microbiana, respiração basal do solo, quociente metabólico e quociente de mineralização

Os resultados demonstraram que a aplicação de ASF no solo, promoveu o aumento dos valores de carbono da biomassa microbiana, nas doses de 75 e 125 kg ha⁻¹ (Figura 4A). Este aumento de Cmic nas doses (75 e 125 kg ha⁻¹) pode ser explicado devido a influência da adubação silicatada sobre a comunidade microbiana, que pode ter influenciado os microrganismos a interagirem, melhorando as condições e desempenho do solo. Os microrganismos presentes no solo, constituem indicadores sensíveis às mudanças ocorridas e importantes para a avaliação da qualidade do solo (DANTAS et al., 2021).

Considerando os resultados obtidos neste estudo sobre o efeito da dose 75 kg ha⁻¹ de ASF, observou-se que essa menor dose promoveu maior estímulo no aumento do carbono da biomassa microbiana (Cmic) em relação às demais doses aplicadas no solo. Essa constatação é comparada com os resultados da pesquisa que avaliou o efeito da aplicação do fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) no solo, utilizando doses de 0, 75, 125, 175 e 225 kg ha⁻¹, na cultura

da cebola. Os resultados desta pesquisa revelaram um aumento significativo na concentração foliar de silício (Si) com a menor dose de fertilizante (75 kg ha^{-1}), refletindo o teor naturalmente baixo de Si disponível no solo. Esse aumento foi seguido por um incremento mais constante nas doses mais elevadas do fertilizante aplicado (NASCIMENTO et al., 2023). Além disso, os resultados deste estudo, apontaram que a aplicação da dose de 225 kg ha^{-1} de ASF resultou em maior rendimento de cebola e concentração de Si. A análise do índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) indicou que a aplicação da dose 225 kg ha^{-1} de ASF contribuiu para obtenção de cebolas mais saudáveis em comparação com o tratamento controle (NASCIMENTO et al., 2023).

No entanto, os resultados do presente estudo, demonstram que a aplicação de ASF, a partir das doses mais elevadas (175 e 225 kg ha^{-1}) promoveram redução no carbono da biomassa microbiana (C_{mic}), atingindo seu menor teor na dose mais elevada (225 kg ha^{-1}). Portanto, a dose 75 kg ha^{-1} de ASF é considerada a dose mais eficiente para este parâmetro.

Segundo Li et al. (2018) o acúmulo de silício na rizosfera e nas plantas, tem a capacidade de mitigar os efeitos adversos das principais formas de estresse, por meio de vários mecanismos de resistência, o que pode resultar no aumento da biomassa e no rendimento das culturas. A aplicação de silício tende a promover a formação precoce da camada dupla cutícula-sílica e das células/corpos de sílica reforçando a resistência aos estresses bióticos. Como resultados desses efeitos benéficos do silício, a recuperação da biomassa vegetal e acúmulo de carbono (LI et al., 2018). A aplicação de silício em culturas sujeitas ao estresse biótico e abiótico podem contribuir significativamente para o aumento do teor de carbono na biomassa (LI et al., 2018).

Estudo sobre os efeitos da aplicação de Si na comunidade bacteriana do solo na rizosfera, descreve que o silício possui a capacidade de atenuar a diminuição da comunidade bacteriana, promovendo o aumento da colonização e abundância de populações específicas no solo. Isso contribui para riqueza e estabilidade do ambiente microbiano na rizosfera (WANG et al., 2020).

Na respiração basal do solo ($C-CO_2$) foram observadas diferenças significativas quando comparadas as doses aplicadas, com aumentos expressivos de seus teores (Figura 4B). Este aumento provavelmente se deve ao fato da relação C/N. De acordo com Yang et al. (2018) o aumento na disponibilidade de carbono (C) e nitrogênio (N) tem o potencial de estimular a atividade microbiana. Esses elementos servem como fontes de nutrientes e energia para os microrganismos do solo. O aumento no nitrogênio disponível permite que os microrganismos utilizem fontes de carbono mais recalcitrantes e o aumento da respiração basal do solo pode ser

por fatores ligados às alterações nas condições de temperatura e umidade do solo que frequentemente resultam em variações substanciais nas taxas de respiração do solo (YAN et al., 2018).

A aplicação de ASF ao solo na dose 225 kg ha⁻¹ promoveu maior atividade respiratória microbiana (56,98 mg kg⁻¹), sendo essa 771,04% maior que o tratamento controle (Figura 4B). Barbosa e Oliveira (2022) descrevem que o aumento da respiração basal pode ser devido a atividade microbiana no solo e utilizado como indicador ou parâmetro para diagnosticar a qualidade e degradação do solo. Em áreas com baixos teores de matéria orgânica do solo (MOS) e perturbação, o aumento das taxas de C-CO₂ possui ligação à decomposição de resíduos orgânicos.

Dessa maneira, altas taxas de C-CO₂ tem relação com o material disponível no solo com a aplicação do fertilizante. Estudo recente, descreve que ciclo biogeoquímico do silício (Si) apresenta efeito positivo no ciclo biogeoquímico do carbono e nitrogênio (incluindo o transporte de nitrogênio para a planta) em áreas agrícolas. Com o aumento do ciclo do Si, ocorre o aumento de CO₂, especialmente quando as condições envolvem estresse abiótico e biótico (LI et al. 2018). O estresse hídrico é conhecido por ser o principal fator que causa redução significativa nas taxas de fotossíntese das plantas. No entanto, vários estudos sugerem que a absorção de silício pode resultar no aumento dos pigmentos fotossintéticos em diversas espécies de vegetais (HASANUZZAMAN et al., 2018; MERWAD; DESOKY.; RADY, 2018).

O quociente metabólico (qCO₂) foi influenciado pela aplicação das crescentes doses de ASF, apresentando aumento gradual e evidenciando a dose mais elevada (225 kg ha⁻¹) (Figura 4C). Esse aumento ocorreu devido à alta atividade microbiana e condições ambientais estressantes que promoveram valores elevados de qCO₂, demonstrando que a biomassa microbiana necessita de uma maior quantidade de carbono para sua sobrevivência e manutenção (ARAÚJO et al., 2019).

O quociente de mineralização (qMin) apresentou aumento com aplicação das doses, evidenciando a dose mais elevada (225 kg ha⁻¹) (Figura 4D). Este aumento do quociente de mineralização pode ser atribuído ao fato de que quando as demandas fisiológicas dos microrganismos do solo por nitrogênio não são atendidas, tendem à buscar nitrogênio orgânico do ambiente. Conseqüentemente, a relação entre carbono e nitrogênio C/N da biomassa microbiana do solo (Cmic) tende a ser constante, associada ao aumento no quociente de mineralização do solo (LI et al., 2019).

A aplicação de silício tem efeito benéfico, suprimindo a absorção excessiva de nitrogênio e melhorando a absorção pelas plantas, tanto em condições deficientes quanto ricas em nitrogênio (LI et al., 2018). Os benefícios do silício (Si) em mitigar os efeitos negativos do fornecimento excessivo de nitrogênio (N) incluem a supressão da absorção excessiva de N, resultando na redução dos níveis de açúcar solúvel e compostos orgânicos de N nas folhas e caules (LI et al., 2018). Além disso, um estudo que avaliou o fornecimento elevado de Si ao arroz, descreveu que o Si pode facilitar a absorção de nitrato pelas plantas, contribuindo para a diminuição da emissão de óxido nitroso (NO) e potencial de desnitrificação do solo (SONG et al., 2017).

Dessa forma, o acúmulo elevado de Si nas culturas pode favorecer o ciclo biogeoquímico do N incluindo o transporte de N do solo para a planta, em terras agrícolas (LI et al., 2018). Portanto, o silício constitui uma forma sustentável e sua disponibilidade no solo regula a absorção de nitrogênio para as plantas.

A aplicação regular de fertilizantes silicatados em condições de solo com deficiência desse elemento é uma prática comum para manter o rendimento sustentável das culturas (LI et al., 2018). O ciclo biogeoquímico do silício (Si) em terras agrícolas desempenha um papel crucial na regulação da absorção de macro e micronutrientes nas culturas, exercendo impactos diversos nos ciclos biogeoquímicos dos nutrientes nas áreas de cultivo (LI et al., 2018).

O estudo que avaliou o efeito do fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) na cultura da cebola, abordando rendimento, qualidade, acúmulo de Si e nutrientes (N, P, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn e Zn), revelou resultados significativos (NASCIMENTO et al., 2023). As doses de ASF resultaram em aumento significativo nos teores de micronutrientes testados nas folhas de cebola em comparação com o controle (NASCIMENTO et al., 2023). A aplicação de ASF no solo promoveu aumento expressivo na concentração de macronutrientes nas folhas, com exceção do cálcio (Ca) (NASCIMENTO et al., 2023). As concentrações de (N), potássio (K) e magnésio (Mg) nas folhas apresentaram aumento linear em resposta à aplicação de ASF, enquanto que o fósforo (P) demonstrou um aumento exponencial que se estabilizou nas doses mais elevadas de (Si) (NASCIMENTO et al., 2023). A sílica amorfa, devido à sua natureza porosa e capacidade de troca catiônica, pode contribuir para a retenção de água e cátions no solo (MAJUMDAR, 2019).

O silício desempenha funções versáteis por promover o crescimento das plantas, influenciando parâmetros morfológicos, processos fotossintéticos, fixação de nitrogênio, produtividade e conseqüentemente a qualidade da cultura (MIR et al., 2020).

5.2 Efeito da aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) sob a atividade enzimática do solo

A atividade da enzima β -glucosidase, relacionada ao ciclo do carbono, apresentou seus maiores teores quando aplicada a dose de 75 kg ha^{-1} , promovendo seu maior aumento (Figura 5A). Este aumento da enzima β -glucosidase ao ser aplicada a dose de 75 kg ha^{-1} , pode estar relacionado com a taxa de mineralização dos resíduos da cultura, ou seja, a mineralização da celulose, um componente principal dos resíduos culturais (CARLOS et al., 2020). Ou seja, diminuiu a mineralização em relação à maior dose, a qual teve maior atividade da β -glucosidase.

Esse resultado pode estar relacionado a compostos carbônicos que representam as principais substâncias que são utilizadas por plantas e microrganismos como fonte de energia em ambientes agrícolas. A celulose é considerada um dos compostos de carbono mais exigentes de decomposição e desempenha um papel fundamental nas atividades exigidas de todos os seres vivos, como fonte de energia. A enzima β -glucosidase, que é ativa no ecossistema do solo, possui limitação na quebra da celulose em glicose por microrganismos (AHMED et al., 2017).

O silício desempenha um papel crucial na regulação dos ciclos biogeoquímicos de carbono, com função importante nas plantas por promover a acumulação de carbono, biossíntese de lignina e absorção de nutrientes em áreas agrícolas (LI et al., 2018). O aumento no fornecimento de Si biodisponível pode aumentar a produção de carbono da biomassa, com destaque para o acúmulo da biomassa radicular para o reservatório de carbono orgânico do solo (LI et al., 2018). Dessa forma, a importância do silício é destacada na regulação do fornecimento de carbono para as plantas.

A enzima arilsulfatase apresentou maior atividade na dose 75 kg ha^{-1} quando comparado com o tratamento no qual não houve a aplicação do ASF (Figura 5B), porém sua atividade foi reduzida com o aumento das doses. Esse aumento pode ser atribuído a influência de variáveis como pH e textura, conforme descrito em um estudo em escala regional que destacou a importância das relações entre essas variáveis e a atividade da arilsulfatase no solo (ARS), que desempenha função essencial na ciclagem do enxofre (CHEN et al., 2019). As propriedades do solo como, pH, exercem influência sobre o destino e comportamento de elementos na rizosfera, podendo influenciar a absorção do elemento no solo (JILLING et al., 2018). O pH ácido em torno de 6,2, modifica a atividade da ARS, promovendo maior atividade microbiana e produção de proteínas (CHEN et al., 2019).

Correlacionando as informações, conforme descrito na (Tabela 1) de características químicas e físicas do solo da área experimental deste estudo, os dados indicam que o solo apresenta um pH ácido, em torno de 5,98, com textura arenosa, características necessárias para que ocorra maior atividade microbiana e atividade da ARS. Os valores de areia, silte e argila, presente na (Tabela 1), indicam uma baixa concentração de nutrientes. O aumento da atividade da arilsulfatase pode ter ocorrido pela deficiência de S, onde os microrganismos precisam desempenhar uma série de etapas fundamentais na reciclagem de compostos orgânicos e inorgânicos e, essa interação entre microrganismos é significativa na região da rizosfera para a mineralização de S orgânico (SANTANA et al., 2021). Dessa forma, a aplicação de Si pode ter melhorado a absorção de nutrientes em condições deficientes e ocorrido maior atividade dos microrganismos para a mineralização do S, favorecendo o aumento da arilsulfatase quando aplicada a dose 75 kg ha⁻¹.

Estudos indicaram que a adição de silício tendeu a reduzir a expressão dos transportadores de silício (OsLsi1 e OsLsi2) em arroz sob deficiências prolongadas de enxofre (S) e essa redução foi ainda mais pronunciada quando o silício foi fornecido (RÉTHORÉ et al., 2020). Por outro lado, o transporte mediado por OsLsi6 não foi suprimido em resposta a deficiência prolongada de S, possivelmente para facilitar o transporte adicional de Si do xilema para a parte aérea. Mesmo com a supressão dos transportadores de S devido ao fornecimento de Si durante o estresse prolongado de S, o maior acúmulo de Si na parte aérea compensou a falta de S, contribuindo para a homeostase do metabólito fonte-dreno (RÉTHORÉ et al., 2020).

Nesse contexto, o Si demonstrou a eficácia na diminuição do nível do estresse, favorecendo o crescimento, desenvolvimento das plantas e destacando o papel regulatório na modulação da homeostase metabólica em condições de deficiência de enxofre (RÉTHORÉ et al., 2020). Os resultados indicaram que a atividade da arilsulfatase tendeu a diminuir com o aumento das doses de ASF. Essa diminuição pode estar associada à aplicação das doses de silício. Pode ter ocorrido deficiência de S no solo que contribuiu para maior acúmulo e atuação do silício para suprir a demanda de enxofre. Levando à diminuição da mineralização e atividade da arilsulfatase nas doses mais elevadas.

A enzima fosfatase alcalina não apresentou diferença entre os tratamentos (Figura 5C). A ausência de efeito diante das doses de silício aplicada sob a atividade da enzima fosfatase alcalina pode ser explicado, a partir de estudo que revelou que a aplicação de fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) no solo resultou em aumento significativo da concentração de macronutrientes nas folhas de cebola (NASCIMENTO et al., 2023). Destacando que as

concentrações de silício nas folhas foram similares às concentrações de fósforo (P). Notavelmente, as concentrações de fósforo (P) apresentaram aumento exponencial atingindo estabilização nas maiores doses de silício (NASCIMENTO et al., 2023).

Segundo os resultados obtidos, o ASF não influenciou a atividade da enzima fosfatase alcalina, conseqüentemente não apresentou diferença entre os tratamentos. Esta constatação pode estar relacionada às concentrações similares e adequadas de Si e P. Os efeitos benéficos do silício na modulação da absorção de fósforo indicam que o ciclo biogeoquímico do silício desempenha um papel significativo na regulação do ciclo biogeoquímico do fósforo e no metabolismo fisiológico da planta (LI et al., 2018). Com base nos resultados obtidos, a aplicação das doses de silício pode ter regulado o fornecimento e absorção de fósforo. As diferentes doses de silício aplicadas podem ter atendido às necessidades fisiológicas da cebola, levando-a a atingir o limite de absorção com concentrações similares de Si e P. Resultando na ausência de diferença entre os tratamentos em relação ao efeito sob a atividade da enzima fosfatase alcalina.

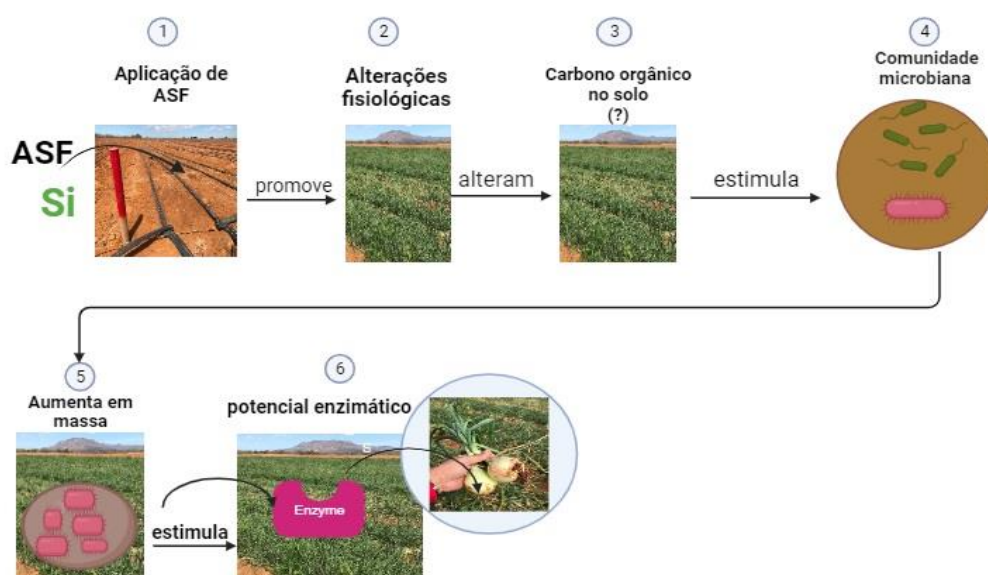
Estudos destacam a interação entre o silício e os microrganismos do solo, presentes no microbioma da rizosfera, que abriga uma diversidade de espécies microbianas. Esses microrganismos desempenham um papel crucial no aprimoramento das culturas, visando à promoção de práticas agrícolas sustentáveis. O silício tem o potencial de melhorar a disponibilidade de nutrientes na região da rizosfera, reduzindo os impactos de estresse bióticos e abióticos por meio da interação entre microrganismos do solo, resultando em crescimento, produtividade e eficácia no desenvolvimento das plantas (VERMA et al., 2022).

Os microrganismos solubilizadores de fosfato, descritos como bactérias solubilizadoras de fosfato (PSB) podem aumentar a disponibilidade de fósforo no solo e realizam a solubilização do fosfato inorgânico, utilizando diversos mecanismos, incluindo a produção de ácidos orgânicos para produção de fosfatos (ZHU; LI; WHELAN, 2018). Em solos que apresentam baixa disponibilidade de fósforo (P), a aplicação de silício (Si) pode melhorar a absorção de P pelas plantas. Esse efeito é alcançado através do aumento da exsudação de ácidos orgânicos das raízes, que ativa nas raízes o gene transportador de P (KOSTIC et al., 2017). Os resultados encontrados corroboram com outros estudos, a aplicação do ASF pode ter estimulado os microrganismos a interagirem com o silício, melhorando a absorção de P e proporcionando efeito similar com a aplicação das doses de ASF sob a atividade da fosfatase alcalina.

5.3 Modelo do efeito de aplicação do fertilizante à base de sílica amorfa (ASF)

A aplicação do fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) promove alterações fisiológicas na planta, que podem alterar o carbono orgânico no solo, estimulam a comunidade microbiana, que aumenta em massa, por sua vez estimula o potencial enzimático do solo (Figura 6).

Figura 6 - Modelo do efeito de aplicação do fertilizante à base de sílica amorfa (ASF)



6 CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que as doses do fertilizante à base de sílica amorfa aumentam a biomassa, atividade bioquímica e diminui a mineralização de C-orgânico no solo. As doses do fertilizante ASF não influenciaram as variáveis COT, qMic, glomalina facilmente extraível e glomalina total. Os quocientes metabólico e de mineralização foram influenciados e aumentaram com a aplicação das doses.

A aplicação das doses do fertilizante silicatado (ASF) influenciou a atividade enzimática, enquanto que a arilsulfatase e β -glucosidase apresentaram reduções com o aumento das doses.

A dose 75 kg ha^{-1} é mais eficiente e econômica, promoveu maior atividade dos seguintes indicadores: respiração basal do solo, quociente metabólico e quociente de mineralização.

O fertilizante à base de sílica amorfa (ASF) atua na microbiota do solo, influenciando os atributos microbiológicos. Isso fornece base científica que respalda a importância do Silício atuando como elemento mitigador de estresse bióticos e abióticos nas plantas de forma sustentável, proporcionando benefícios e produtividade para cultura da cebola.

REFERÊNCIAS

AHMED, A.; NASIM, F. U.; BATOOL, K.; BIBI, A. Microbial β -glucosidase: sources, production and applications. **Journal of Applied & Environmental Microbiology**, Newark, DE, 5, n. 1, p. 31-46, 2017. <https://doi.org/10.12691/jaem-5-1-4>

ALI, N.; RÉTHORÉ, E.; YVIN, J.-C.; HOSSEINI, S. A. The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses. **Plants**, Basel, 9, n. 12, p. 1779, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9121779>

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental condition, such as pH on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 25, n. 3, p. 393- 395, 1993. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)

ARAÚJO, T. S.; GALLO, A. S.; ARAÚJO, F. S.; SANTOS, L. C.; GUIMARÃES, N. F.; SILVA, R. F. Biomassa e atividade microbiana em solo cultivado com milho consorciado com leguminosas de cobertura. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 42, n. 2, p. 347-357, 2019. <https://doi.org/10.19084/rca.15433>

ATTA, B.; RIZWAN, M.; SABIR, A. M.; GOGI, M. D.; AYUB, M. A. Silicon mediated induced resistance in plants for the management of agricultural insect pests: a review. **World Journal of Biology and Biotechnology**, Pakistan, v. 4, n. 1, p. 19-27, 2019. <https://doi.org/10.33865/wjb.004.01.0192>

BAKHAT, H. F.; BIBI, N.; ZIA, Z.; ABBAS, S.; HAMMAD, H. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, M. R.; SHAN, G. M.; RABBANI, F.; SAEED, S. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: a review. **Crop Protection**, Guildford, Eng., v. 104, p. 21-34, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>

BARBOSA, T. C. S.; OLIVEIRA, V. P. V. Indicadores químicos e biológicos de qualidade do solo utilizados no monitoramento da degradação em ambientes semiáridos: análise do estado da arte. **Brazilian Journal of Development**, Paraná, v. 8, n. 3, p. 17403-17423, 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-126>

BHALLA, S.; BISHT, A.; GARG, N. Silicon and arbuscular mycorrhizal species complement in improving soil characteristics, sulfur metabolism and antioxidant defense responses in arsenic stressed *Cajanus cajan* (L.) Millsp. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Abingdon, v. 63, n. 14, p. 2814-2832, 2023. <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2175354>

BHARDWAJ, S.; KAPOOR, D. Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, 166, p. 1044-1053, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.005>

BINI, D.; SANTOS, C. A. dos; BERNAL, L. P. T.; ANDRADE, G.; NOGUEIRA, M. A. Identifying indicators of C and N cycling in a clayey Ustisol Under different tillage and uses in winter. **Applied Soil ecology**, Amsterdam, v. 76, p. 95-101, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.12.015>

BORASE, D. N.; NATH, C. P.; HAZRA, K. K.; SENTHILKUMAR, M.; SINGH, S. S.; PRAHARAJ, C. S.; SINGH, U.; KUMAR, U. Long-term impact of diversified crop rotations and nutrient management practices on soil microbial functions and soil enzymes activity. **Ecological Indicators**, New York, v. 114, e106322, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106322>

BOTTA, A.; SIERRAS, N.; MARÍN, C.; CÁRRION, M.; PIÑOL, R. Powdery mildew protection with armurox: an improved strategy for silicon application. **Journal of Agricultural Science and Technology A**, Libertyville, IL, p. 1032-1039, 2011.

<https://doi.org/10.17265/2161-6256/2011.11a.012>

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical biochemistry**, Orlando, 8 FL, v. 72, p. 248-254, 1976. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)

BROUGHTON, R. C. I.; NEWSHAM, K.K.; HILL, P.W.; STOTT, A.; JONES, D. L. Differential acquisition of amino acid and peptide enantiomers within the soil microbial community and its implications for carbon and nitrogen cycling in soil. **Soil Biol. Soil biology & biochemistry**, Oxford, v. 88, p. 83-89, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.05.003>

BYBORDI, A.; SAADAT, S.; ZARGARIPOUR, P. The effect of zeolite, selenium and silicon on qualitative and quantitative traits of onion grown under salinity conditions. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Abingdon, Oxfordshire, v. 64, n. 4, p. 520-530, 2018. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1373278>

CARLOS, F. S.; DENARDIN, L. G. de O.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F.; ROSSI, I.; BUCHAIN, M. P.; CEREZA, T.; CARMONA, F. de C.; CAMARGO, F. A. de O. Integrated crop–livestock systems in lowlands increase the availability of nutrients to irrigated rice. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 31, n. 18, p. 2962-2972, 2020. <https://doi.org/10.1002/ldr.3653>

CAMARGO, M. S. Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. **International Plant Nutrition Institute**, Piracicaba, n. 155, 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Boletim Hortigranjeiro**, Brasília, DF, v. 9, n. 12, dez. 2023.

CASSEL, J. L.; GYSI, T.; ROTHER, G. M.; PIMENTA, B. D.; LUDWIG, R. L.; SANTOS, D. B. Benefícios da aplicação de silício em plantas. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Paraná, v. 4, n. 4, p. 6601-6615, 2021. doi: 10.34188/bjaerv4n4-140

CASSOL, J. C.; SPONCHIADO, D.; DORNELLES, S. H. B.; TABALDI, L. A.; BARRETO, E. P. M.; PIVETTA, M.; LOPES, S. J. Silicon as an attenuator of drought stress in plants of *Oryza sativa* L. treated with dietholate. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 81, n. 4, p. 1061-1072, 2020. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.235052>

CHEN, H.; LIU, J.; LI, D.; XIAO, K.; WANG, K. Controls on soil arylsulfatase activity at a regional scale. **European Journal of Soil Biology**, Paris, 90, p. 9-14, 2019.

DANTAS, J. O.; PERIN, L.; ANDRADE, A. R.; BARROS, C. C. *et al.* Artrópodes e microbiota do solo em sistema agroecológico de produção no semiárido nordestino, Simão Dias, Sergipe. *In*: SOUSA, CS; LIMA, FS; SABIONI, SC. **Agroecologia: métodos e técnicas para uma agricultura sustentável**. Guarujá, SP: Científica Digital, p. 267-281, 2021.

DAS, S.; HWANG, H. Y.; SONG, H. J.; CHO, S. R.; NOSTRAND, J. D. V.; KIM, P. J. Soil microbial response to silicate fertilization reduces bioavailable arsenic in contaminated paddies. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 159, e 108307, 2021.

DOUMER, M. E.; GIACOMINI, S. J.; SILVEIRA, C. A. P.; WEILER, D. A.; BASTOS, L. M.; FREITAS, L. L. Microbial and enzymatic activities in the soil after application of retorted oil shale. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 11, p. 1538-1546, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001100016>

ETESAMI, H.; JEONG, B. R.; GLICK, B. R. Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Phosphate-Solubilizing Bacteria, and Silicon to P Uptake by Plant. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, e 699618, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618>

ETESAMI, H.; JEONG, B. R.; RIZWAN, M. The use of silicon in stressed agriculture management: action mechanisms and future prospects. *In*: DESMUKH, R.; TRIPATHI, D. K.; GUERRIERO, G. (ed.). **Metalloids in plants: advances and future prospects**. New York: John Wiley & Sons, 2020. p. 381-431.

ETESAMI, H.; SCHALLER, J. Improving phosphorus availability to rice through silicon management in paddy soils: a review of the role of silicate-solubilizing bacteria. **Rhizosphere**, Amsterdam, v. 27, e100749, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100749>

FENG, G.; XIE, T.; WANG, X.; BAI, J.; ZHAO, H.; WEI, W.; WANG, M.; ZHAO, Y. Metagenomic analysis of microbial community and function involved in cd-contaminated soil. **BMC microbiology**, London, v. 18, n. 11, e11, 2018. doi: 10.1186/s12866-018-1152-5

FONTURA, A; CAMPOS, D. V. B. Carbono orgânico. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. p. 360-365.

FREW, A.; WESTON, L. A.; REYNOLDS, O. L.; GURR, G. M. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. **Annals of botany**, Oxford, 121, n. 7, p. 1265-1273, 2018. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>

GAUR, S.; KUMAR, J.; KUMAR, D.; CHAUHAN, D. K.; PRASAD, S. M.; SRIVASTAVA, P. K. Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: a review. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, Amsterdam, v. 202, e110885, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110885>

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ANEE, T. I.; KHAN, M. I. R.; FUGITA, M. Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress

tolerance in *Brassica napus* L. **South African Journal of Botany**, Pretoria, v. 115, p. 50-57, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.12.006>

HÖMBERG, A.; BRODER, T.; KNORR, K.-H.; SCHALLER, J. Divergent effect of silicon on greenhouse gas production from reduced and oxidized peat organic matter. **Geoderma**, v. 386, e114916, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114916>

IMTIAZ, M.; RIZWAN, M. S.; MUSHTAQ, M. A.; ASHRAF, M.; SHAHZAD, S. M.; YOUSAF, B.; SAEED, D. A.; RIZWAN, M.; NAWAZ, M. A.; MEHMOOD, S.; TU, S. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: a review. **Journal of Environmental Management**, London, v. 183, p. 521-529, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.009>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Malha municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 10 maio 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção Agrícola Municipal 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/14/0>. Acesso em: 10 set. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 jun. 2019.

JILLING, A.; KEILUWEIT, M.; CONTOSTA, A. R.; FREY, S.; SCHIMEL, J.; SCHNECKER, J.; SMTH, R. G.; TIEMANN, L.; GRANDY, A. S. Minerals in the rhizosphere: overlooked mediators of soil nitrogen availability to plants and microbes. **Biogeochemistry**, Netherlands, v. 139, n. 2, p. 103-122, 2018.

JHONSON, S. N.; POWELL, J. R., FREW, A.; CIBILIS, X. Silicon accumulation suppresses arbuscular mycorrhizal fungal colonisation in the model grass *Brachypodium distachyon*. **Plant and Soil**, v. 477, p. 219–232, 2022.

KAPOOR, D.; BHARDWAJ, S.; LANDI, M.; SHARMA, A.; RAMAKRISHNAN, M.; SHARMA, A. The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. **Applied Sciences**, Cham, v. 10, n. 16, p. 5692, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10165692>

KOSTIC, L.; NIKOLIC, N.; BOSNIC, D.; SAMARDZIC, J.; NICOLIC, M. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. **Plant and Soil**, v. 419, p. 447-455, 2017.

KOUR, D.; KAUR, T.; DEVI, R.; YADAV, A.; SINGH, M.; JOSHI, D.; SINGH, J.; SUYAL, D. C.; KUMAR, A.; RAJPUT, V. D.; YADAV, A. N.; SINGH, K.; SINGH, J.; SAYYED, R. Z.; ARORA, N. K.; SAXENA, A. K. Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future

challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, Landsberg, v. 28, n. 20, p. 24917-24939, 2021.

LEITE, M. R. L.; ALCÂNTARA NETO, F.; DUTRA, A. F.; MENDES, L. W.; MIRANDA, R. S.; MELO, V. M. M.; OLIVEIRA, F. A. S.; SOUSA, T. K. dos S. A.; COSTA, R. M.; ROCHA, S. M. B.; PEREIRA, A. P. de A.; PRADO, R. de M.; ARAUJO, A. S. F. Distinct sources of silicon shape differently the rhizospheric microbial community in sugarcane. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 193, e105131, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105131>

LEITE, M. R. L.; ALCÂNTARA NETO, F.; DUTRA, A. F.; MENDES, L. W.; ANTUNES, J. E. L.; MELO, V. M. M.; OLIVEIRA, F. A. S.; ROCHA, S. M. B.; PEREIRA, A. P. de A.; PRADO, R. de M.; ARAUJO, A. S. F. Silicon application influences the prokaryotic communities in the rhizosphere of sugarcane genotypes. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 187, e104818, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104818>

LI, Z.; TIAN, D.; WANG, B.; WANG, J.; WANG, S.; CHEN, H. Y. H.; XU, X.; WANG, C.; HE, N.; NIU, S. Microbes drive global soil nitrogen mineralization and availability. **Global Change Biology**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 1078-1088, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14557>

LI, Z.-C.; SONG, Z.-L.; YANG, X.-M.; SONG, A.-L.; YU, C.-X.; WANG, T.; XIA, S.; LIANG, Y.-C. Impacts of silicon on biogeochemical cycles of carbon and nutrients in croplands. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 17, n. 10, p. 2182-2195, 2018. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62018-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62018-0)

LIN, W.-P.; JIANG, N.-H.; LI, P.; FAN, X.-Y.; GAO, Y.; WANG, G.-P.; CAI, K.-Z. Silicon impacts on soil microflora under *Ralstonia Solanacearum* inoculation. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 19, n. 1, p. 251-264, 2020.

LIU, L.; SONG, Z.; YU, C.; YU, G.; ELLAM, R. M.; LIU, H.; PAL SINGH, B.; WANG, H. Silicon effects on biomass carbon and phytolith-occluded carbon in grasslands under high-salinity conditions. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, e657, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00657>

MA, C.; CI, K.; ZHU, J.; SUN, Z.; LIU, Z.; LI, X.; ZHU, Y.; TANG, C.; WANG, P.; LIU, Z. Impacts of exogenous mineral silicon on cadmium migration and transformation in the soil-rice system and on soil health. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 759, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143501>

MAJUMDAR, S. Silicon in Indian Agriculture. **Silicon**, New York, v. 11, p. 1-3, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-0012-0>

MANDLIK, R.; THAKRAL, V.; RATURI, G.; SHINDE, S.; NIKOLIĆ, M.; TRIPATHI, D. K.; SONAH, H.; DESHMUKH, R. Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 71, n. 21, p. 6703-6718, 2020. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>

MARTINS, M. E. **Atributos de um Latossolo sob aplicação de vinhaça e cultivo de cana-de-açúcar**. 2011. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

MELLONI, R.; COSTA, N. R.; MELLONI, E. G. P.; LEMES, M. C. S.; ALVARENGA, M. I. N.; NUNES NETO, J. Sistemas agroflorestais cafeeiro-araucária e seu efeito na microbiota do solo e seus processos. **Revista Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 784-795, 2018. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832392>

MENDES, L.W.; CHAVES, M. G. de; FONSECA, M. de C.; MENDES, R.; RAAIJMAKERS, J. M.; TSAI, S. M. Resistance breeding of common bean shapes the physiology of the rhizosphere microbiome. **Frontiers in microbiology**, Lausanne, v. 10, e2252. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02252>

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005.

MENEGALE, C. L. M.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 4, n. esp., p. 435-454, 2015.

MERWAD, A.-R. M. A.; DESOKY, E.-S. M.; RADY, M. M. Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application. **Scientia Horticulturae**, v. 228, p. 132-144, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.008>

MESQUITA, A. C.; SILVA, J. L.; SILVA, K. E. S.; YURI, J. E.; SOUZA, M. A. de. Cultivo de cebola sobre diferentes sistemas de irrigação no Vale do São Francisco. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 20.; SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 5., 2017, Juazeiro, BA. Anais [...]. Juazeiro: UNIVASP, 2017.*

MIR, R. A.; BHAT, K. A.; SHAH, A. A.; ZARGAR, S. M. Role of silicon in abiotic stress tolerance of plants. *In: Improving abiotic stress tolerance in plants: CRC Press, 2020. p. 271-290.*

MOE, L. A. Amino acids in the rhizosphere: from plants to microbes. **American journal of botany**, Baltimore, v. 100, n. 9, p. 1692-1705, 2013. <https://doi.org/10.3732/ajb.1300033>

NASCIMENTO, C. W. A. do; BARROS, M. K. D. de; SILVA, F. B. V. da; LIMA, L. H. V.; SILVA, F. L. de; VELOSO, V. de L.; SILVA, J. R.; LINS, S. A. da. S. NDVI, Nutrient Accumulation and Yield of Onion Fertilized with Amorphous Silica in a Semiarid Setting in Brazil. **Silicon**, New York, 15, n. 7, p. 3011-3020, 2023.

NOGUEIROL, R. C.; MELO, W. J.; BERTONCINI, E. I.; ALLEONI, L. R. F. Concentrations of Cu, Fe, Mn, and Zn in tropical soils amended with sewage sludge and composted sewage sludge. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, Holland, v.185, n. 4, p. 2929-2938, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2761-3>

- PASCALE, A.; PROIETTI, S.; PANTELIDES, I. S.; STRINGLIS, I. A. Modulation of the root microbiome by plant molecules: the basis for targeted disease suppression and plant growth promotion. **Frontiers in plant science**, Lausanne, v. 10, e1741, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01741>
- PONCE, F. da S.; MACHADO, D. C. de L.; DIPPLE, F. L.; DALLACORT, R.; SEABRA JÚNIOR, S. Adubação silicatada na produtividade e respostas fisiológicas das plantas. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 11, n. 16, e164111637926, 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i16.37926>
- RÉTHORÉ, E.; ALI, N.; YVIN, J.-C.; HOSSEINI, S. A. Silicon regulates source to sink metabolic homeostasis and promotes growth of rice plants under sulfur deficiency. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 21, n. 10, e3677, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijms21103677>
- SÁ, C. S. B. de; SHIOSAKI, R. K.; SANTOS, A. M. dos; CAMPOS, M. A. da S. Salinization causes abrupt reduction in soil nematode abundance in the Caatinga area of the Submedio San Francisco Valley, Brazilian semiarid region. **Pedobiologia**, Jena, G. Fischer, v. 85-86, e 150729, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2021.150729>
- SANTANA, M. M.; DIAS, T.; GONZALEZ, J. M.; CRUZ, C. Transformation of organic and inorganic sulfur—adding perspectives to new players in soil and rhizosphere. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 160, e108306, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108306>
- SANTOS, L. F.; OLIVARES, F. L. Plant microbiome structure and benefits for sustainable agriculture. **Current Plant Biology**, Amsterdam, v. 26, e100198, 2021.
- SHAHZAD, S.; ALI, S.; AHMAD, R.; ERCISLI, S.; ANJUM, M. A. Foliar application of silicon enhances growth, flower yield, quality and postharvest life of tuberose (*Polianthes tuberosa* L.) under saline conditions by improving antioxidant defense mechanism. **Silicon**, New York, v. 14, p. 1115-1118, 2022.
- SHARMA, S.; SINGH, P.; SODHI, G. P. S. Soil organic carbon and biological indicators of uncultivated vis-à-vis intensively cultivated soils under rice–wheat and cotton–wheat cropping systems in South-Western Punjab. **Carbon Management**, London, v. 11, n. 6, p. 681-695, 2020. <https://doi.org/10.1080/17583004.2020.1840891>
- SHERENE, T. Role of soil enzymes in nutrient transformation: a review. **Bio Bull**, v. 3, n. 1, p. 109-131, 2017.
- SINGH, A. K.; ZHU, X.; CHEN, C.; WU, J.; YANG, B.; ZAKARI, S.; JIANG, X. J.; SINGH, N.; LIU, W. The role of glomalin in mitigation of multiple soil degradation problems. **Critical reviews in Environmental Science and Technology**, Boca Raton, v. 52, p. 1604-1638, 2022. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1862561>
- SONG, A. L.; FAN, F. L.; YIN, C.; WEN, S. L.; ZHANG, Y.; FAN, X.; LIANG, Y. The effects of silicon fertilizer on denitrification potential and associated genes abundance in paddy soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 53, p. 627–638, 2017.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. *In*: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. (ed.) **Methods of soil analysis: Part 2. Microbiological and biochemical properties**. Madison, WI: SSSA, 1994. p. 778-833.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of *p*-nitrophenol phosphatase for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 1, p. 301-307, 1969.

TANG, J.; ZHANG, J.; REN, L.; ZHOU, Y.; GAO, J.; LIN, L.; YANG, Y.; PENG, Q.; HUANG, H.; CHEN, A. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. **Journal of Environmental Management**, London, v. 242, p. 121-130, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061>

TIWARI, R.; DWIVEDI, B. S.; SHARMA, Y. M.; SHARMA, A.; DWIVEDI, A. K. Activities of β -glucosidase, Phosphatase and Dehydrogenase as Soil Quality Indicators: A Review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Kancheepuram, v. 8, n. 6, p. 834-846, 2019. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.806.101>

VIEIRA, S.; SIKORSKI, J.; DIETZ, S.; HERZ, K.; SCHRUMPF, M.; BRUELHEIDE, H.; SCHEEL, D.; FRIEDRICH, M. W.; OVERMANN, J. Drivers of the composition of active rhizosphere bacterial communities in temperate grasslands. **The ISME Journal**, v. 14, n. 2, 463-475, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0543-4>

VERMA, K. K.; SONG, X.-P.; LI, D.-M.; SINGH, M.; WU, J.-M.; SINGH, R. K.; SHARMA, A.; ZHANG, B.-Q.; LI, Y.-R. Silicon and soil microorganisms improve rhizospheric soil health with bacterial community, plant growth, performance and yield. **Plant Signaling & Behavior**, Georgetown, TX, v. 17, n. 1, e2104004, 2022. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2104004>

WANG, B.; CHU, C.; WEI, H.; ZHANG, L.; AHMAD, Z.; WU, S.; XIE, B. Ameliorative effects of silicon fertilizer on soil bacterial community and pakchoi (*Brassica chinensis* L.) grown on soil contaminated with multiple heavy metals. **Environmental Pollution**, Barking, v. 267, e115411, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115411>

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Science**, Abingdon, Oxfordshire, v. 161, n. 9, p. 575-586, 1996.

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, v. 198, p. 97-107, 1998.

YAN, Z.; BOND-LAMBERTY, B.; TODD-BROWN, K. E.; BAILEY, V. L.; LI, S.; LIU, C.; LIU, C. A moisture function of soil heterotrophic respiration that incorporates microscale processes. **Nature Communications**, London, v. 9, n. 1, e2562, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04971-6>

YANG, F.; WU, J.; ZHANG, D.; CHEN, Q.; ZHANG, Q.; CHENG, X. Soil bacterial community composition and diversity in relation to edaphic properties and plant traits in grasslands of southern China. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 128, p. 43-53, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.04.001>

YANG, J.; YANG, F.; YANG, Y.; XING, G.; DENG, C.; SHEN, Y.; LUO, L.; LI, B.; YUAN, H. A proposal of “core enzyme” bioindicator in long-term Pb-Zn ore pollution areas based on topsoil property analysis. **Environmental Pollution**, Barking, v. 213, p. 760-769, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.030>

ZHAO, M.; ZHAO, J.; YUAN, J.; HALE, L.; WEN, T.; HUANG, Q.; VIVANCO, J. M.; ZHOU, J.; KOWALCHUK, G. A.; SHEN, Q. Root exudates drive soil-microbe-nutrient feedbacks in response to plant growth. **Plant, cell & environment**, Oxford, v. 44, n. 2, p. 613–628, 2021. <https://doi.org/10.1111/pce.13928>

ZHU, J.; LI, M.; WHELAN, M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 612, p. 522-537, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.095>

APÊNDICE A – Fontes, total de nutrientes, adubação de solo e fertirrigação

Tabela 1 – Fontes, adubação e fertirrigação

Datas	13/jul	19/jul	25/jul	02/ago	09/ago	06/ago	21/ago	29/ago	06/set	12/set	x
Adubos	Kg/ha										
Ureia	20,0	0,0	33,0	135,0	50,0	150,0	62,0	0,0	0,0	0,0	0
MAP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,0	0,0	0,0	15,0	0
KCL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	25,0	25,0	65,0	80
SOP	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	50,0	50,0	50,0	50,0	25,0	0
Nitrato de Cálcio	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
Cloreto de Cálcio	0,0	0,0	18,0	17,0	0,0	25,0	35,0	22,0	22,0	20,0	0
Sulfato de Magnésio	15,0	35,0	40,0	30,0	33,0	40,0	40,0	40,0	35,0	25,0	0
Drop Gold 13-42-13	0,0	0,0	25,0	20,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
Ácido Fosfórico	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	4,0	0,0	4,0	5
SAM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	72,0	30,0	0,0	0
MKP	10,0	20,0	0,0	0,0	0,0	15,0	0,0	17,0	15,0	0,0	0
16-16-16	0,0	0,0	0,0	200,0	0,0	200,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
Idade	19	25	31	39	46	53	58	66	74	80	89

MAP - Fosfato monoamônico; KCL: Cloreto de potássio; SOP – Sulfato de potássio; SAM - Sulfato de amônio; MKP: Fosfato Monopotássico.

Tabela 2 – Total de nutrientes

Aduobos	Totais	N	P	K	Ca	Mg
Ureia	450	203				
MAP	31	4	19			
KCL	235			141		
SOP	250			125		
Nitrato de Cálcio	15	2			3	
Cloreto de Cálcio	159				43	
Sulfato de Magnésio	333					30
Drop Gold 13-42-13	60	8	25	8		
Ácido Fosfórico	22		9			
SAM	102	21				
MKP	77		40	26		
16-16-16	400	64	64	64		
Idade	2134	302	157	364	46	30

MAP - Fosfato monoamônico; KCL: Cloreto de potássio; SOP – Sulfato de potássio; SAM - Sulfato de amônio; MKP: Fosfato Monopotássico.

Tabela 3 – Plantio, colheita e ciclo

Plantio	24/06/2021
Colheita	06/10/2021
Ciclo	104