

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Fracionamento de silício em solos com diferentes históricos de cultivo

Helena Trindade da Silva

Passo Fundo

2022

Helena Trindade da Silva

Fracionamento de silício em solos com diferentes históricos de cultivo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção de título de mestre em Agronomia.

Orientador:
Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi

Passo Fundo

2022

CIP – Catalogação na Publicação

S586f Silva, Helena Trindade da
Fracionamento de silício em solos com diferentes
históricos de cultivo[recurso eletrônico] / Helena Trindade
da Silva. – 2022.
1.4 MB. ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade
de Passo Fundo, 2022.

1. Silício – Solos. 2. Solos – Cobertura vegetal. 3. Ciclos
biogeoquímicos. 4. Mineralogia do solo. I. Bortoluzzi,
Edson Campanhola, orientador. II. Título.

CDU: 631.41

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

“Fracionamento de silício em solos com diferentes históricos de cultivos”

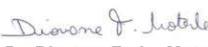
Elaborada por

Helena Trindade da Silva

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestra em
Agronomia – Produção e Proteção de Plantas

Aprovada em: 27/05/2022
Pela Comissão Examinadora


Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador - UPF


Dr. Diovane Freire Moterle
Examinador externo
IFRS


Dr. Jackson Korchagin
Examinador
UPF


Dra. Nadia Canali Lângaro
Coordenadora do PPGAgro
UPF


Dr. Eraldo Lourenso Zanella
Diretor da Faculdade de Agronomia e
Medicina Veterinária – FAMV/UPF

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Ivete de Fátima Trindade da Silva, a principal responsável pela minha educação, minha formação pessoal e profissional, meu maior exemplo e quem permanece ao meu lado, me dando todo suporte, amor e carinho necessário. Ao meu pai, Valdemar Bilhar da Silva, por ser forte, superando as dificuldades que enfrentamos e sempre me apoiar em todas as minhas escolhas. Aos meus irmãos Tiago Trindade da Silva e Rafael Trindade da Silva por serem exemplos de dedicação na vida pessoal, acadêmica e profissional e através disto, me instigarem a ser o melhor de mim. Ao meu sobrinho Francisco Bortolini da Silva por reinventar em mim, durante todos os momentos compartilhados, as diversas formas de olhar a vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais, Valdemar Bilhar da Silva e Ivete de Fátima Trindade da Silva, pelos ensinamentos, auxílio, incentivo e apoio incondicional durante todo o período de mestrado.

Aos meus irmãos Tiago Trindade da Silva e Rafael Trindade da Silva, por estarem sempre presentes na construção da minha vida pessoal e profissional.

Ao meu sobrinho Francisco Bortolini da Silva, pela compreensão nos momentos de estudo e escrita.

Ao professor e meu orientador Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi, por todas as oportunidades e ensinamentos durante o período do mestrado.

Às minhas colegas de laboratório Ana Hummes, Elisângela Sordi, Luana Dalacorte e Tatiana Benedetti, pelas trocas de experiência e momentos compartilhados durante este percurso.

Aos estagiários do laboratório, Gabriel Güntzel e Lara Ranzi, por toda dedicação e auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de turma 2020/1 e amigos de mestrado, em especial ao Emanuel Dall'Agnol, Gustavo Visentin, Isabela Buttini, Maicon Balbinotti, Monikéli A. da Silva e Tatiana Benedetti, por todas as trocas de experiência, todo aprendizado e partilha de momentos especiais e felizes.

A todos os meus amigos, com quem compartilhei histórias de anseios e alegrias nestes últimos anos, saibam que vocês também contribuíram com a minha evolução para chegar aonde estou.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pelos ensinamentos e auxílios.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

À Manuelli Zulpo, pelo apoio na minha formação profissional desde a graduação até a conclusão do mestrado.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esta etapa da minha vida fosse concluída.

“Quem desconfia fica sábio”

Guimarães Rosa

RESUMO

SILVA, Helena Trindade da. Fracionamento de silício em solos com diferentes históricos de cultivo. [91] f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2022.

A ação antrópica interfere diretamente nos nossos ecossistemas. Apesar de o dióxido de silício (SiO_2) ser um dos compostos mais abundantes da Terra, diversas são as formas químicas encontradas desse elemento no solo e os efeitos da ação antrópica sobre a dinâmica de silício (Si) ainda são poucos conhecidos. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar se a extração e exportação de Si do solo pelo cultivo agrícola anual ao longo dos anos influencia no teor do elemento nas suas diferentes formas químicas presente no solo. Nesse sentido, foi quantificados os teores de silício em suas diferentes formas presentes em solos utilizados para produção agrícola por diferentes tempos (2, 8 e 40 anos) confrontando-se com o campo nativo (situação testemunha). As formas de Si quantificado foram: fração móvel, adsorvida, associada à matéria orgânica do solo, oclusa em sesquióxidos de Fe e Al e sílica amorfa. Também se estudou a relação das formas de Si do solo com as possíveis alterações de tamanho de partícula do solo e a mineralogia, através de análises de tamanho de partícula e difração de raio-x (DRX). Os resultados obtidos foram analisados através do modelo linear e as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey ($p < 0,05$) de probabilidade de erro quando necessário. A proporção das formas de Si é, em ordem decrescente: sílica amorfa > Si ligado à matéria orgânica do solo > Si adsorvido no complexo de troca > Si ocluso em óxidos do solo > Si móvel. A fração Si móvel possuiu sua maior quantidade na lavoura de 40 anos comparada ao campo nativo. O campo nativo apresentou a maior quantidade de Si ligado à matéria orgânica do solo e sílica amorfa. As partículas de solo apresentaram maior tamanho para o campo nativo. Os tempos de cultivo avaliados não mostraram alteração na mineralogia do solo. Pode-se concluir que o sistema agrícola avaliado, ao longo dos anos altera o ciclo biogeoquímico do Si. Nossos resultados indicam haver a necessidade de manejo da fertilidade do solo que considere o elemento Si e sua ciclagem. Ainda, o uso do solo com culturas acelera o processo de dessilicação pela extração do elemento e por consequência o aumento do intemperismo do solo.

Palavras-chave: 1. Ciclo biogeoquímico. 2. Ciclagem. 3. Cobertura vegetal. 4. Dessilicação. 5. Uso do solo.

ABSTRACT

SILVA, Helena Trindade da. Silicon fractionation in soils with different cultivation histories. [91] f. Dissertation (Masters in Agronomy) – University of Passo Fundo, Passo Fundo, 2022.

Anthropogenic action directly interferes with our ecosystems. Although silicon dioxide (SiO₂) is one of the most abundant compounds on Earth, there are several chemical forms found for this element in the soil and the effects of human action on the dynamics of silicon (Si) are still poorly understood. Thus, the objective of the present work was to evaluate whether the extraction and export of Si from the soil by annual agricultural cultivation over the years influences the content of the element in its different chemical forms present in the soil. In this sense, the levels of silicon in its different forms present in soils used for agricultural production for different times (2, 8 and 40 years) were quantified in comparison with the native field (control situation). The quantified forms of Si were: mobile fraction, adsorbed, associated with soil organic matter, occluded in Fe and Al sesquioxides and amorphous silica. The relationship of soil Si forms with possible changes in soil particle size and mineralogy was also studied through particle size and x-ray diffraction (XRD) analysis. The results obtained were analyzed using the linear model and the means were compared using the Tukey test ($p < 0.05$) of error probability when necessary. The proportion of Si forms is, in decreasing order: amorphous silica > Si bound to soil organic matter > Si adsorbed in the exchange complex > Si occluded in soil oxides > Mobile Si. The mobile Si fraction had its highest amount in the 40-year-old crop compared to the native field. The native grassland showed the highest amount of Si bound to soil organic matter and amorphous silica. Soil particles were larger for the native grassland. The cultivation times evaluated showed no change in soil mineralogy. It can be concluded that the evaluated agricultural system, over the years, changes the biogeochemical cycle of Si. Our results indicate that there is a need for soil fertility management that considers the Si element and its cycling. Also, the use of the soil with cultures accelerates the process of desilication by the extraction of the element and, consequently, the increase of soil weathering.

Key words: 1. Biogeochemical cycle. 2. Cycling. 3. Vegetal layer. 4. Desilication. 5. Use of the soil.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	<i>Elemento silício</i>	15
2.2	<i>Silício no solo</i>	16
2.2.1	<i>Formas químicas de silício no solo</i>	16
2.2.2	<i>Processo de Intemperismo do solo</i>	19
2.2.3	<i>Dinâmica do silício no solo</i>	22
2.3	<i>Silício na planta</i>	23
2.3.1	<i>Sílica biogênica: Fitólitos</i>	25
2.4	<i>Manejo de solo e formas de Si no solo frente extração de Si via planta e grão</i>	27
2.5	<i>Fracionamento do silício</i>	29
3	MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1	<i>Localização do experimento e caracterização da área</i>	32
3.2	<i>Tratamentos</i>	32
3.3	<i>Coleta das amostras de solo</i>	33
3.4	<i>Análises</i>	33
3.4.1	<i>Extração sequencial do silício</i>	33
3.4.2	<i>Métodos de determinação de silício no solo</i>	36
3.4.3	<i>Soluções usadas</i>	38
3.4.3.1	<i>Soluções para extração</i>	38
3.4.3.2	<i>Soluções método colorimétrico</i>	38
3.4.4	<i>Granulometria do solo</i>	39
3.4.5	<i>Caracterização da mineralogia do solo</i>	41
3.5	<i>Análise estatística</i>	41
4	RESULTADOS	43
4.1	<i>Extração sequencial do silício</i>	43
4.2	<i>Soma das frações de Si, teores totais e balanço do elemento no solo</i>	44
4.3	<i>Granulometria do solo</i>	46
4.4	<i>Mineralogia do solo</i>	50
5	DISCUSSÃO	58
5.1	<i>Relação entre as frações de Si nos solos</i>	58
5.2	<i>Influência do uso nas frações de Si do solo</i>	59
5.3	<i>Perspectivas no uso e manejo do solo baseado no Si</i>	60

<i>5.4 Mineralogia do solo após aplicação da extração sequencial de Si</i>	63
6 CONCLUSÃO	66
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS	68
ANEXOS	85
<i>Anexo I Análise da variância das variáveis avaliadas no trabalho</i>	86
<i>Anexo II Principais formas e características dos fitólitos</i>	88
<i>Anexo III Formas de fitolíticas encontradas em campo nativo (A) e lavoura de 40 anos (B)</i>	90

1 INTRODUÇÃO

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre e está presente em muitos minerais (WEDEPOHL, 1995). Cerca de 42% dos minerais que compõem a fração sólida do solo são silicatados e os argilominerais fazem parte desse grupo (MELLO, 2013). Os argilominerais dos solos são formados por diferentes combinações das estruturas de Si (MELLO, 2013) e a partir do agrupamento dos tetraedros de Si originam uma lâmina junto com o agrupamento de octaedros de alumínio (MELLO, 2013). Os agrupamentos classificam os argilominerais em duas categorias: argilomineral 2:1 (2 tetraedros de Si e 1 octaedro de Al) e argilomineral 1:1 (1 tetraedro de Si e 1 octaedro de Al) (MELLO, 2013).

A quantidade de Si nos solos dependem do material de origem e do tipo de solo (SOOMER et al., 2006) e o seu ciclo biogeoquímico desempenha papel essencial na manutenção da sustentabilidade dos ecossistemas terrestres (CONLEY, 2002; SOMMER et al., 2006; SONG et al., 2018 a,b).

Três são as fases de Si que compõem o solo: líquida, adsorvida e sólida. A fase sólida pode ser classificada como pouco cristalina, microcristalina, amorfa e formas cristalinas de Si. A forma cristalina é a maior fração de Si encontrada na fase sólida, principalmente como silicatos primários, secundários e materiais silicáticos. A fase amorfa é composta por Si biogênico (originado de resíduos vegetais e restos de microrganismos) ou pedogênicos (complexos de Si com Al e Fe, metais pesados e matéria orgânica do solo) (MATICHENCOV; BOCHARNIKOVA, 2001). A fase líquida é composta por ácido monossilícico e polissilícico. O ácido monossilícico (H_4SiO_4) ocorre de forma monomérica e é essa forma de Si que as plantas conseguem absorver o elemento (TUBANA; BABU; LAWRENCE & DATNOFF, 2016).

Após o elemento ser absorvido pelas plantas na forma de (H_4SiO_4) , ele é transportado através do xilema e depositado como sílica no tecido vegetal de toda a planta. O Si está presente nas plantas constituindo entre 1 e 10% da sua massa seca (CORNELIS et al., 2011). É através da proporção dessa constituição que ocorre a classificação das plantas como acumuladoras e não acumuladoras de Si (CORNELIS et al., 2011). As plantas não acumuladoras são aquelas até 5% de Si constituindo a sua massa seca, já as plantas acumuladoras são as que possuem até 10% de Si em sua massa seca (CORNELIS et al., 2011).

A alteração da cobertura vegetal, realizada pela atividade humana, altera diretamente o ciclo do Si e modifica a composição do solo. O uso intensivo de áreas agrícolas, como lavouras anuais, aumenta, conseqüentemente a quantidade de Si extraído.

Dessa forma, o estudo se propõe a responder a seguinte questão de pesquisa: o uso do solo pelo cultivo, ao longo dos anos, influencia a dinâmica do Si no solo?

O trabalho tem a seguinte hipótese: A produção agrícola no decorrer dos anos interfere na dinâmica das diferentes formas químicas de Si presente no solo, como consequência, haverá reorganização na estrutura do solo.

O objetivo geral do trabalho foi avaliar se a extração e exportação de Si pelos cultivos agrícolas anuais influenciou a dinâmica do elemento no solo. Nesse sentido, buscou-se a quantificação dos teores de silício em suas diferentes fases e frações presentes em solos utilizados para produção agrícola por diferentes tempos (2, 8 e 40 anos) confrontando-se com o campo nativo (situação testemunha); também foi objeto do nosso estudo relacionar as formas de Si do solo com a distribuição do tamanho de partícula e alterações mineralógicas.

Espera-se, ao final da pesquisa, através da quantificação das frações de silício em amostras de solo de campo nativo e diferentes históricos de lavoura, esclarecer a dinâmica do elemento para a condição avaliada.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão de literatura apresenta informações relacionadas ao elemento silício (Si) e sua presença no solo, assim como as diferentes formas químicas que podemos encontrá-lo, a fim de compreender a dinâmica do elemento no sistema solo-planta. Para o levantamento das informações foram consultados artigos científicos publicados em periódicos e revistas, assim como livros, considerando as principais descobertas sobre o tema da pesquisa publicadas até o momento.

2.1 Elemento Silício

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre (27%), ficando atrás somente do oxigênio (45%). O elemento foi isolado pela primeira vez por Berzelius, no ano de 1823, por meio da redução de K_2SiF_6 , com potássio no estado de fusão (TOMA, 2013). Pertencente à família 4 A, com massa atômica 28μ , número atômico 14 (prótons e elétrons) e estado de oxidação de +4 (LIRA, 2020).

O elemento ocorre na forma de silicatos e quartzo (SiO_2) e cristaliza como uma estrutura de diamante com uma distância Si-Si igual a 0,235 nm (TOMA, 2013). Sendo o SiO_2 um dos compostos mais abundantes da crosta terrestre (DANILOVA et al., 2010), a solubilidade do mesmo depende da composição, estrutura e granulometria dos diferentes minerais silicáticos (SZIKSZAY, 1993).

As rochas que possuem maior quantidade de silício em sua composição são as ígneas, originadas a partir do resfriamento e solidificação de massas de rochas fundidas, denominadas como magma, no interior da crosta terrestre. Usando como valor de referência a quantidade de SiO_2 presente em sua composição, elas são classificadas como: ácidas (>65%), intermediárias (<65% e >52%), básicas (<52% e >45%) e ultrabásicas (<45%) (KER et al., 2012).

2.2 Silício no solo

Em função do grau de intemperismo dos solos tropicais, o silício está presente no solo normalmente na forma de opala e quartzo (MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015), sendo o feldspato o mineral que sofre o processo de intemperização de forma mais acelerada e assim considerado a principal fonte de silício em sua forma disponível presente no solo (PEREIRA et al., 2007).

Solos recém-formados tendem a apresentar maiores teores totais do elemento do que a mesma classe de solo anos após sua formação (TISDALE et al., 1985). O teor total de silício nos solos depende da mineralogia (MCKEAGUE; CLINE, 1963) e apesar do elemento estar entre os mais abundantes da crosta terrestre e presente em consideráveis quantidades na maioria dos solos, várias classes de solos, conforme seu material de origem e sua mineralogia, contam com pouca presença do elemento solúvel nos horizontes superiores (RAIJ; CAMARGO, 1973). Assim, indicam menor quantidade de Si disponível para as plantas, pois para que o elemento seja absorvido por elas é necessário que componha a solução do solo na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) (HENRIET et al., 2008).

A degradação dos minerais primários de silicatos litogênicos libera solutos que podem se recombinar para sintetizar argila neoformada, os quais podem se dissolver e contribuir para reabastecer o silício disponível com H_4SiO_4 (CHURCHMAN; LOWE, 2012; SPOSITO, 2008). A principal reação de dissolução dos silicatos é a hidrólise, a qual se caracteriza pelo desequilíbrio das valências das superfícies de contato dos minerais silicáticos, permitindo a hidratação. Em condições normais a hidratação transforma o dióxido de silício em ácido monossilícico (H_4SiO_4) e, em pH acima de 9, transforma para as formas de silicatos (SiO_3^{2-}), ácido ortossilícico ($Si(OH)_6^{2-}$) (CHURCHMAN; LOWE, 2012).

2.2.1 Formas químicas de silício no solo

Durante as últimas décadas, o interesse em pesquisas sobre o ciclo de Si em solos e sedimentos aumentou fortemente. Minerais primários e secundários, bem como sílica biogênica (sílica amorfa hidratada derivada de organismos), pode atuar como fonte para o ácido silícico, ou seja, a forma dissolvida de Si (SOMMER et al., 2013; CHADWICK; CHOROVER, 2001). O intemperismo de minerais específicos também é discutido como um importante consumo de CO₂, porque a formação de carbonato de cálcio a partir dos silicatos de cálcio mobilizam o ácido silícico e ligam-se ao CO₂ (KÖHLER; HARTMANN; WOLF-GLADROW, 2010; BEERLING et al., 2020). Além disso, os fitólitos são discutidos como consumidores de carbono orgânico (PARR et al., 2010) que é potencialmente o carbono remanescente a partir do molde de proteína que molda os fitólitos (HARRISON, 1996).

As frações de Si nos solos compreendem Si dissolvido (na forma de ácido monossilícico, ácido polissilícico ou complexos de ácido silícico e compostos inorgânicos) na solução do solo como uma fase líquida e a complexação do ácido silícico com compostos orgânicos também foi evidenciado (SAUER et al., 2006). Estas formas de Si dissolvido podem adsorver às partículas do solo, especialmente Fe ou óxidos/hidróxidos de Al (SAUER et al., 2006; CORNELIS; DELVAUX, 2010; OPFERGELT et al., 2010). A fase sólida de Si compreende diferentes formas de Si amorfo (ASi): (1) Si amorfo biogênico (bASi, por exemplo, fitólitos) e (2) formas minerogênicas (nódulos de sílica e sílica incluída em óxidos pedogênicos como óxidos de ferro). O termo “amorfo” foi introduzido por mineralogistas para descrever fases ao usar difratometria de raios-X. No entanto, em estudos sobre a química da sílica em solos, o termo “amorfo” é usado para quantificar Si, que pode ser extraído por reagentes definidos (Na₂CO₃ e NaOH) ou seja, sem qualquer declaração sobre a cristalinidade ou não das fases extraídas (SAUER et al., 2006).

Outras fases sólidas de Si são formas pouco cristalinas e microcristalinas (alofane, imogolita, opala-CT, calcedônia e quartzo secundário) (SAUER et al., 2006). Normalmente o Si presente nas fases nos solos são formas cristalinas em termos de silicatos primários (por exemplo, quartzo, feldspato, micas, olivinas e piroxênios) e

minerais secundários, por exemplo, os diferentes minerais argilosos (SAUER et al., 2006).

O ácido silícico presente na solução do solo pode ser absorvido pelas plantas (MA; YAMAJI, 2006) e um crescente interesse de pesquisadores ecologistas e agrícolas vem sendo observado para entender as diferentes formas de Si em solos e disponibilidade de Si neles e em sedimentos. No entanto, o ácido silícico pode não só ser disponível para absorção pelas plantas, mas também se ligar-se a minerais secundários (OPFERGELT, 2010), sendo parte dos constituintes dos argilominerais secundários (CORNELIS; DELVAUX, 2010).

Os solos brasileiros apresentam em média cerca de 5 a 40% de silício em suas composições (MA et al., 2001), encontrados principalmente, segundo Korndorfer et al. (2003), nas formas de silício solúvel, estrutural em minerais silicatados (primários e secundários), ocluso em sesquióxidos de Fe, Al e Mn e sílica amorfa mineral e biogênica do solo.

O Si na fração móvel do solo, é o Si que está na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) na solução do solo, sendo o principal componente da solução, disponível e de fácil absorção para os vegetais (ILER, 1979).

O Si estrutural em minerais silicatados (primários e secundários) também é conhecido por Si adsorvido. Essa é a forma do Si presente nos argilominerais do solo. Como as argilas são abundantes na composição dos solos, se tornam fonte substancial de Si para as plantas. Contudo, dependendo da mineralogia da argila haverá diferentes taxas de dissolução (KELLER; RIZWAN; MEUNIER, 2021).

O Si associado a matéria orgânica é o Si que faz parte da composição da matéria orgânica presente no solo (GEORGIADIS, 2013).

Si ocluso em sesquióxidos de Fe e Al é quando o elemento está em forma cristalizada juntamente com os óxidos (RENNERT, 2022). Já a sílica amorfa é o Si sem

forma definida que pode ser de origem mineral ou biogênica. O Si amorfo mineral possui maior solubilidade do que a sílica amorfa biogênica e apresenta alta taxa de dissolução em pH básico (BARÃO et al., 2020).

As taxas de ciclismo de Si em ecossistemas terrestres dependem de fatores ambientais que regem os processos de formação do solo, entre eles estão: clima, topografia, material parental do solo, idade e fatores bióticos: vegetação, microrganismos e manejo e uso do solo. Fatores bioclimáticos como percolação de água, produção de biomassa e energia solar, possuem controle sob a mudança contínua do solo ao longo do tempo. O equilíbrio interativo entre esses processos é a base da diversidade do solo, caracterizada pela mineralogia constante do mesmo, ligada ao conteúdo e à estabilidade dos minerais que apresentam Si. Além disso, as transformações pedogênicas são fortemente influenciadas pelo conjunto de minerais de silicatos, através da atividade do ácido monossilícico na solução do solo (ALEXANDRE et al., 1997; ALEXANDRE; BOUVET; ABBADIE, 2011; CORNELIS et al., 2011 a; SOMMER et al., 2006; STREET-PERROTT; BARKER, 2008; WHITE et al., 2012).

2.2.2 Processo de intemperismo do solo

O intemperismo é um processo geológico exógeno e é o primeiro passo para inúmeros outros processos geológicos, geomorfológicos e bioquímicos, sendo importante para a gênese de solos. Três são os tipos de intemperismo que ocorrem: físico, químico e biológico (KER et al., 2012). Os tipos de intemperismo são processos que produzem materiais que apresentam pouca semelhança com as rochas originais (MARTINS et al., 2004).

O intemperismo físico causa a fragmentação das rochas através da desagregação e fraturamento de grãos minerais da rocha, assim o material que antes era coeso se torna friável e descontínuo (TOLEDO et al., 2014). Assim, uma rocha pode se subdividir em tamanhos menores passando de matacões, calhaus, cascalhos, do que se tem um conjunto de minerais primários e atingir o tamanho das frações de areia e silte. Todos os processos que promovem esforços suficientes para quebrar as rochas caracterizam o intemperismo

físico, o qual ainda é subdividido em intemperismo físico-termal e mecânico (KER et al., 2012). Além disso, esse processo não promove alterações químicas e mineralógicas em relação ao material de origem (TOLEDO et al., 2014; KER et al., 2012).

O intemperismo químico causa alterações marcantes na composição química e ou mineralógica da rocha original, tendo como principais agentes: a água, temperatura e gases e como principais reações: a dissolução, hidrólise e oxidação. É caracterizado por uma transformação química dos minerais primários, oriundos da rocha original, para minerais secundários, formados pelo intemperismo. Estas transformações ocorrem por meio de ações individualizadas ou conjuntas dos agentes do intemperismo, através de uma série de reações químicas inerentes ao processo (KER et al., 2012). As alterações químicas e mineralógicas ocorrem devido o contato da rocha com o ambiente de superfície, pois os minerais são percolados por soluções aquosas enriquecidas especialmente em CO₂ e muito de seus constituintes são lixiviados (MARTINS et al., 2004). Assim, novas fases minerais são formadas dos resíduos das alterações e a composição química e mineralógica que vai compor o resultado do processo é dependente do material de origem e do ambiente de formação (LOUGHNAN, 1969). Dessa forma, esse tipo de intemperismo afeta a distribuição e o conteúdo de nutrientes e as estruturas e demais parâmetros mineralógicos (LASAGA, 1980; DREVER, 1988; WIELAND et al., 1988, BIBER et al., 1994; LASAGA et al., 1994; DREVER, 1994).

Já o intemperismo biológico é caracterizado pelas ações de organismos vivos – desde bactérias e fungos até plantas superiores e animais – que causam alterações químicas e físicas. Um dos importantes fenômenos deste tipo de intemperismo é a quelatação: processo biológico no qual os organismos produzem substâncias conhecidas como quelatos, que têm a habilidade de aprisionar cátions metálicos por uma ou mais de suas ligações químicas. Essa característica permite que os cátions metálicos possam ser mais facilmente removidos da estrutura cristalina, tornando os minerais e rochas mais fáceis de decompor (KER et al., 2012).

O intemperismo ocorre em diferentes velocidades e a variação da resistência das rochas a este processo depende de certas características, ou atributos (composição

mineralógica, cor, textura e estrutura), que as tornam mais ou menos susceptíveis aos ataques intempéricos, e assim, inicia o processo de gênese dos solos (KER et al., 2012). As reações ao intemperismo provocam diminuição da energia livre em um sistema (KALINOWSKI, 1997).

O desgaste das rochas leva à uma degradação de produtos tanto no espaço, como no tempo, resultando em perfis de solo com variações de profundidade, gerando a diminuição no conteúdo de minerais silicatados presentes no solo – da profundidade para a superfície – sendo que essas variações ocorrem em dimensão vertical e horizontal. Os fatores de interferência no intemperismo mineral são responsáveis pela condução das variações de profundidade, sendo eles: o conteúdo e a solubilidade dos aluminossilicatos primários em silicatos litogênicos, a disponibilidade de água e a entrada de prótons, assim como a precipitação de silício neoformado e produção de solutos que serão absorvidos por plantas ou lixiviados do solo e transferido para a hidrosfera, sendo eles diretamente ligados à rocha-mãe, biota, clima e tempo (CHURCHMAN; LOWE, 2012).

A dissolução da sílica dos minerais primários depende das propriedades da solução, tais como: o estado no qual a sílica se encontra (grau de cristalização ou fase amorfa), tempo das reações químicas, temperaturas, presença de vários sais, compostos inorgânicos e orgânicos e pH (YARIV; CROSS, 1979). O aumento do intemperismo leva ao domínio sucessivo de diferentes minerais secundários com diminuição do teor de silício, que são controlados pela diminuição dos níveis de silício disponível, este é o processo natural de dessilicção do solo. A dessilicção leva à sequência de meteorização que pode ser ilustrada através da relação Quantidade-Intensidade (Q-I). O conceito Q-I foi desenvolvido para prever a dinâmica dos nutrientes das plantas nos solos e é amplamente utilizado para a avaliação da fertilidade do solo. O Q-I liga o estoque de silício em minerais resistentes (Q) à atividade do ácido monossilícico (I). O fator da intensidade (I) é dependente do valor de quantidade (Q), ou seja, a quantidade de mineral que contém silício que tem potencial para ser dissolvido (LINDSAY, 1979).

A temperatura afeta a taxa de dissolução do mineral através da lei de Arrhenius (RAI; KITTRICK, 1989), e a neoformação controla a distribuição de soluto no perfil do

solo (CHADWICK; CHOROVER, 2001). O tempo é um fator importante porque governa o estágio de intemperismo do solo em determinadas condições ambientais. Szczerban e Urbani (1974) ressaltam que a resistência da sílica ao intemperismo químico é bastante variável, decorrente dos diferentes estados morfológicos na qual ela se encontra, além disso, a temperatura, através da sua elevação promove a aceleração da maioria das reações químicas, resultando em maior dissolução (FABRI; AUGUSTIN; AULER, 2014). De acordo com Krauskopf (1972), a solubilidade da sílica não está vinculada ao valor do pH, caso este se posicione entre 2 e 9, tendendo a se tornar realmente solúvel apenas em condições de pH superiores a 9. Em função dessas limitações, baixas taxas de dissolução, em geral inferiores a 10ppm, podem ser esperadas nas águas de arenitos e quartzitos, (GALÁN, 1991; MECCHIA; PICCINI, 1999; WRAY, 1997a; WIEGAND et al., 2004).

Assim, a ação antrópica altera a quantidade de reservatórios Si biogênico e não biogênico ao longo do perfil do solo, isso ocorre porque solos e ecossistemas atuam como um “filtro” do elemento, transformando o Si originado do intemperismo mineral em Si biogênico, para que as plantas possam absorver (BARÃO et al., 2020).

Contudo, é de conhecimento que a vegetação altera o ciclo dos elementos no solo, como por exemplo, a transformação de illita em vermiculita ocasionada pela extração de potássio pela cultura da videira ao longo dos anos (BORTOLUZZI et al., 2012). E quando se trata do Si, estudos realizados em solos cultivados com monocultura de cana-de-açúcar, avaliando o passado, o presente e futuro do elemento em mesma área de cultivo, apontam que ao longo dos anos, está ocorrendo a diminuição dos teores do elemento presente no solo (BERTHELSEN et al., 2001). Além disso, foi realizada uma estimativa de diminuição de 10% na quantidade de Si presente em solos usados para a agricultura na Suécia (CLYMANS et al., 2011). Isso está atrelado ao fato de que já foi observado a diminuição das concentrações de Si no solo devido a exportação de palha durante 153 anos no Reino Unido (GUNTZER, 2012).

2.2.3 Dinâmica do silício no solo

Os solos são sistemas biogeoquímicos dinâmicos e multicomponentes que sofrem transformações, levando a uma sequência de horizontes do mesmo (SPOSITO, 2008) ligando a pedosfera à litosfera, biosfera atmosfera e hidrosfera. Os processos envolvendo a biogeoquímica de Si nos solos são fundamentais na evolução dos constituintes e propriedades deles, assim como, no funcionamento da biosfera. A pedodiversidade é importante para a produção de alimentos, a qualidade da água, as mudanças climáticas, a saúde humana e a diversidade das plantas (JANZEN et al., 2011; LALIBERTÉ et al., 2013; MCBRATNEY et al., 2013), mas também para a relação codependente entre o ciclo biogeoquímico global dos elementos e biogeoquímica de Si terrestre (RANGUENEAU et al., 2000).

O DSi – Silício dissolúvel - é encontrado normalmente na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) e é o principal componente das soluções do solo (ILER, 1979). O ácido silícico pode ser monomérico ou polimérico, sendo que para ser polimérico precisa estar em condições fortemente alcalinas (DIETZEL, 2002). Na forma polimérica é composto por dois ou mais átomos de Si e pode ocorrer em diferentes formas, como por exemplo, cadeias, formas ramificadas ou aglomerados esféricos (DIETZEL, 2002).

O papel dos processos de formação do solo sobre a respectiva contribuição de fontes inorgânicas e biogênicas para o conjunto de silício dissolvido e seu efeito sobre o silício biológico são pouco documentados, levando em consideração a comparação com demais elementos como nitrogênio, fósforo e carbono (GALLOWAY et al., 2003; ROCKSTRÖM et al., 2009; SMIL, 2000).

2.3 Silício na planta

As plantas são classificadas como acumuladoras e não acumuladoras de Si, sendo as primeiras capazes de acumular até 10 g kg^{-1} e as segundas capazes de acumular no máximo até 5 g kg^{-1} . As gramíneas fazem parte do grupo de plantas acumuladoras, já as fabáceas estão entre as não acumuladoras. A absorção do Si pelas plantas, ocorre através da difusão, com passagem do ácido monossilícico do meio mais concentrado para o

menos concentrado, sendo que a absorção total realizada, de maneira geral, por diversas espécies de vegetais, varia de 2 a 90 kg ha⁻¹ (CORNELIS et al., 2011).

O Si não é considerado como elemento essencial para as plantas (EPSTEIN, 1999), contudo, a absorção do ácido monossilícico traz diversos benefícios, como por exemplo: diminuição da transpiração, melhora da arquitetura da planta ao tornar as folhas mais eretas e assim, melhorar a taxa fotossintética, além de aumentar a tolerâncias dos vegetais ao ataque de doenças e pragas (DEREN et al., 1994). Além do mais, o silício pode estimular o crescimento e a produção vegetal indiretamente, causando aumento no teor de clorofila nos tecidos foliares e ao alterar a arquitetura da planta, passa a evitar o auto sombreamento excessivo, atrasando a senescência, aumentando a rigidez estrutural dos tecidos e protegendo as plantas de agentes bióticos e abióticos (MARSCHNER, 1995; EPSTEIN; BLOOM, 2006; MA; YAMAJI, 2008).

Os benefícios do Si em plantas não-acumuladoras, como é o caso da soja (*Glycine max* L.) não são totalmente conhecidos, apesar disso, não se pode desconsiderar a essencialidade do elemento no sistema solo-planta (MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015). A essencialidade do Si no solo está relacionada a sua importância na constituição dos argilominerais e no processo de formação dos solos (MENEGALE; CASTRO; MANCUSO, 2015). Já em relação as plantas, de acordo com Epstein & Bloom (2005), o elemento cumpre o segundo dos critérios da nova definição de essencialidade dos nutrientes, onde os autores citam: “a planta pode ser tão severamente privada do elemento que ela exibe anormalidades em seu crescimento, desenvolvimento ou reprodução, isto é, seu desempenho em comparação com planta não privadas.”

O benefício do Si no acúmulo de fitomassa em plantas cultivadas está ligado às alterações na estrutura das plantas, permitindo, por exemplo, melhor captação de energia solar e redução no acamamento. Mesmo que ainda não seja conhecida a função do silício no metabolismo vegetal (EPSTEIN; BLOOM, 2006), se acredita que o elemento solubilizado na planta tem papel na síntese de moléculas de defesa em plantas (RODRIGUES et al., 2004; MA; YAMAJI, 2008). Além disso, foi notado um aumento da sua absorção em uma condição de estresse, tanto biótico ou abiótico, que é chamada

de defesa induzida pelo silício. Assim, se pode notar, que o elemento é utilizado pelas culturas para que elas suportem a condição de estresse fisiológico estabelecido (OLIVEIRA, 2009).

A forma de sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), na qual o silício é depositado nas plantas, fez com que estudiosos considerassem o silício um elemento com pouca mobilidade, pois a sílica, ao se combinar com compostos orgânicos celulares, como celulose e hemicelulose, dificulta a movimentação do elemento (OLIVEIRA, 2009). Atualmente, os mecanismos de absorção já são conhecidos de forma mais detalhada, e assim, é de conhecimento que existem transportadores do elemento dentro da planta. Estudos com o objetivo de caracterizar os transportadores de silício e os genes responsáveis pela sua sinalização, tiveram início com o mapeamento do gene *Lsi1* (NAWZ et al., 2019).

O primeiro transportador do ácido monossilícico foi identificado na cultura do arroz (MA et al., 2004a). A principal ação desse gene está concentrada na exoderme e endoderme das raízes, e é responsável pela sinalização de um transportador de efluxo de ácido monossilícico. Simultaneamente ao gene *Lsi1* foi encontrado o gene *Lsi2*, o qual é responsável pela sinalização de um transportador de efluxo de ácido monossilícico (MA et al., 2007). O gene *Lsi6* está localizado nas folhas e é responsável pelo transporte do silício do xilema para as células das folhas, conseqüentemente pela deposição de silício (YAMAJI; MITANI; MA, 2008). O transporte e acúmulo de silício pode ocorrer a favor de um fluxo de transpiração, sendo o acúmulo regulado pela produção de matéria seca. A relação da produção e o acúmulo, segue, dessa forma, um comportamento em curva sigmóide (JONES; HANDRECK, 1967; MAUAD, 2006).

2.3.1 Sílica biogênica: Fitólitos

Os fitólitos são partículas de sílica hidratada que se formam durante o crescimento da planta após a absorção do ácido monossilícico pelas raízes, sendo em seguida, depositada nos espaços inter e intracelulares (LUZ et al., 2015). As razões da produção de fitólitos pelas plantas são pouco conhecidas, contudo, Madella (2005), salienta ao menos quatro possibilidades, sendo elas:

- a) Oferecer suporte mecânico para as células;
- b) Dar suporte aos órgãos e estruturas da planta;
- c) Proteger as plantas de herbívoros e parasitas;
- d) Neutralizar ânions e cátions nocivos ao desenvolvimento das plantas.

Poaceae, Cyperaceae, Ulmaceae, Fabaceae, Cucurbitaceae e Asteraceae, são famílias de plantas que apresentam grande capacidade de produção e acumulação de corpos siliciosos. Contudo, as espécies pertencentes a família Poaceae, são conhecidas como grandes produtoras de fitólitos, sendo que a sua produção pode atingir de 1 a 5 % de silício no peso seco, cerca de 20 vezes superior as espécies pertencentes à família Fabaceae (WEBB; LONGSTAFFE, 2000).

Mesmo após a morte do vegetal, os fitólitos não são destruídos e são depositados em solos ou sedimentos, por serem materiais inorgânicos composto por sílica, diferente dos restos macrobotânicos orgânicos, não necessitam de condições específicas de preservação, todavia, podem estar sujeitos à quebra mecânica (JENKINS, 2009). Além disso, outra característica dos fitólitos, é a sua preservação por longos períodos, sendo considerados um dos fósseis mais duráveis de plantas terrestres, assim, sua análise se torna uma importante ferramenta para estudos de reconstrução paleoambiental (PIPERNO, 2006). A durabilidade leva à outras características, como por exemplo, a menor taxa de liberação de Si de resíduos de plantas para o solo, quando comparado a demais elementos, como o potássio, por exemplo (SORATTO et al., 2012).

Uma única forma de fitólitos pode aparecer em diversas espécies, raramente uma forma em específico pode ser relacionada a um táxon (BREMONT et al., 2005). Quando procuramos informações sobre acúmulo de fitólitos encontramos na literatura dados indicando que o conteúdo de fitólitos das plantas varia de menos de 50 g kg⁻¹ até mais que 150 g kg⁻¹ (EPSTEIN, 1994; PARR et al., 2010), principalmente devido às diferenças filogenéticas nos requisitos de Si da maioria das dicotiledôneas e algumas gramíneas

(HODSON et al., 2005), bem como a quantidade de sílica disponível no ambiente (SEYFFERTH et al., 2013). Em geral, o conteúdo de fitólitos varia de <0,5% na maioria das dicotiledôneas a ~3%, em gramíneas de terras altas típicas, e pode chegar a 10–15% nas Cyperaceae e em espécies de Poaceae das zonas úmidas (EPSTEIN, 1994; PARR et al., 2010).

As espécies gramíneas perenes presentes no campo nativo são uma grande reserva de Si biológico devido ao maior acúmulo de fitólitos nessas plantas quanto comparado ao Si produzido por espécies leguminosas (DALACORTE, 2022). Os fitólitos têm um tamanho entre 2 e 60 µm e são compostos principalmente de sílica (~92 % em peso), água (~6 % em peso) com alguma quantidade de carbono (1,7%) e traços de Al (0,04%) e Fe (0,08%) (MEUNIER; COLIN, 1999). Os compostos de Si existente nos solos, principalmente, sob a forma de sílica opalina (fitólito) estão principalmente no horizonte A.

Em solo de campo nativo já foi quantificado através de pesagem 0,63% de composição de fitólitos, já em solos de lavoura de 40 anos cultivado com *Glycine max* L. foi quantificado 0,36% de composição de fitólitos. Sendo os principais morfotipos identificados para campo nativo: elongate, cavate, elongate sinuate, cylindric sinuate, rectangular aerolate, rectangular nodulate e globular nodulate. E para a lavoura de 40 anos cultivada com leguminosa os principais morfotipos identificados foram: acicular, saddle, elongate smooth, bilobate, rondel, rectangular e saddle (DALACORTE, 2022).

2.4 Manejo de solo e formas de Si no solo frente a extração de Si via planta e grão

Recentemente foi demonstrado que a atividade humana altera diretamente o ciclo do Si no solo através do uso e mudança da cobertura do mesmo (GUNTZER et al., 2012), pois o fornecimento de DSi em sistemas terrestres inicia a partir do momento em que solos e ecossistemas atuam como um “filtro” de Si, transformando o Si originado do intemperismo mineral em Si biogênico (BSi) (BARÃO et al., 2020). Assim, o aumento da produção agrícola global alterou a quantidade de sílica biogênica (Bsi) presente no sistema do solo, pois as práticas agrícolas muitas vezes esgotam a quantidade de BSi que

pode vir a ser dissolvido devido a remoção realizada pelas plantas que são colhidas. Em sistemas não gerenciados – florestas – o BSi produzido pelas plantas é devolvido ao solo durante queda de folhas, onde a dissolução relativamente rápida do BSi na decomposição fornece o Si necessário para que as próximas plantas façam a extração (GUNTZER et al., 2012).

Na tabela 1 podemos observar a estimativa de extração de Si para culturas anuais, como arroz, milho, soja e trigo.

Tabela 1: Consumo estimado de Si da parte aérea com base na média de 10 anos (2004-2013) da área colhida, nível de produção das culturas nos Estados Unidos, e sua proporção de biomassa/porção colhida e quantidade de Si extraído.

Culturas	Área produtiva	Produção ¹		Autores	Produção de biomassa ³	Si na biomassa ⁴	Estimativa de extração anual de Si ⁵	Extração de Si ⁶
	Milhões ha	Milhões tons	B/H Razão ²		Milhões de ton	g kg ⁻¹	t	kg ha ⁻¹
Arroz	1.203	9,48	1.0	Summer et al. (2003)	9,48	41,7	395,173	329
Milho	32.555	307,81	1.0	Renard et al. (1997)	307,81	13,6	4.209.964	129
Trigo	19.865	58,35	1.5	Renard et al. (1997)	87,53	24,5	2.144.278	108
Soja	29.841	84,69	1.5	Renard et al. (1997)	127,04	13,9	1.765.738	59

Fonte: Tubana et al., 2016

¹: Quantidade colhida das culturas (grãos); ²: Relação de biomassa para parte colhidas da planta; ³: produção estimada de biomassa; ⁴: Conteúdo de Si relatado na parte aérea conforme Hodson et al., (2005); ⁵: razão entre B/H e Si da parte aérea; ⁶: estimativa da absorção de Si da parte aérea dividida pela área colhida com média de 10 anos.

A quantidade de Si que é extraída pela planta, o teor do elemento na biomassa e o quanto é exportado via grão, faz com que seja recomendado que a palha seja deixada no solo para que ocorra a ciclagem do elemento, pois a palha é frequentemente a parte mais rica em Si da planta, e assim, evita que as diminuições do elemento ocorram em maior quantidade e de forma mais acelerada (ou seja, em menor período de uso do solo). Isso ocorre devido a presença de Si nos restos vegetais e a liberação do elemento via

dissolução de origem biogênica (GUNTZER et al., 2012). Além disso, uma diminuição de fitólitos em solos temperados, em algumas décadas de uso do solo para produção agrícola foi observada, o que contribuiu para a diminuição das fontes biogênicas de Si no sistema (STRUYF et al., 2012).

2.5 Fracionamento químico de Si

O uso de técnicas de fracionamento permite inferências sobre a origem, forma de ocorrência, biodisponibilidade, fluxos, mobilidade, transporte, dinâmica e transformações entre as diferentes formas químicas dos elementos em solos agrícolas (MILLER et al., 1986).

A sequência dos reagentes utilizados para a extração das diferentes formas de silício segue uma ordem de alto a baixo relacionadas ao pH. Pois a dissolução das formas de silício mais retidas ocorre preferencialmente em pH extremos, sendo ácidos ou básicos. Assim, as primeiras frações são extraídas com CaCl_2 e ácido acético, sendo esses reagentes promotores de soluções que extraem formas do elemento solúvel e trocável, especificamente o Si adsorvido (BABU et al., 2017).

O Si associado à matéria orgânica do solo (Si_{org}) deve ser extraído através da queima da matéria orgânica, fazendo com que o teor de elemento presente nessa fração fosse liberado para a solução do solo. Já o Si ocluso aos sesquióxidos de Fe e Al do solo (Si_{occ}) é extraído do solo com solução de oxalato de amônio e ácido oxálico no escuro (AOD), em pH 3, que frequentemente é usado para quantificar espécies pedogênicas de alumínio (Al), ferro (Fe) e silício (Si). Esses incluem, em extensão quantitativa variável, hidróxidos de Fe (oxi-), Al e Fe em associação orgânica, aluminossilicatos como alofano e imogolita, óxidos de Al e Al de camada intermediária de hidróxi (por exemplo) (RENNERT, 2019). O Oxalato atua como um ligante que solubiliza íons Al e Fe em condições ácidas, quando a protonação em pH 3 enfraquece as ligações metal-oxigênio. Os protocolos de extração AOD sugeridos por Schwertmann (1964), McKeague & Day (1966) têm sido aplicados com muita frequência. De acordo com o Google Scholar no outono de 2021, ambos os protocolos foram citados mais de 2000 vezes cada. Eles têm a

concentração do extratante (oxalato de amônio 0,2 M em ácido oxálico, pH 3) em comum, mas diferem no tempo de extração (Schwertmann (1964), 2 h; McKeague & Dia (1966), 4 h). Esses autores, juntamente com Farmer et al. (1983), relataram quantidades crescentes de Al e Fe extraídos do solo, frações de partículas e minerais com o aumento do tempo de extração (RENNERT, 2022).

Enquanto a sílica amorfa biogênica e mineral apresenta maiores taxas de dissolução em pH extremamente básicos (BARÃO, 2020), para isso soluções com reagentes como NaOH são recomendados (GEORGIADIS, 2011).

Os métodos usados extrair formas de Si específicas incluem extrações químicas em altas temperaturas e ambientes alcalinos e, portanto, são incapazes de fornecer informações sobre o potencial de dissolução desses reservatórios BSi e não-BSi em condições normais de temperatura e pH (BARÃO et al., 2020).

A partir do embasamento teórico realizado acima foi possível adquirir o apoio necessário para desenvolver um estudo químico sobre o fracionamento de Si em solos cultivados com soja a 2, 8 e 40 anos consecutivamente e solo de campo nativo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização do experimento e caracterização da área

O estudo de caso foi conduzido no município de Água Santa – RS, altitude de 650 metros, e coordenadas geográficas 28°10'37" S, 52°02'02" O. A classificação climática da região é Cfa, segundo Köppen-Geiger, com temperatura média de 20,6 °C e precipitação média anual de 1409 mm, pertencendo ao bioma Mata Atlântica (KÖPPEN-GEIGER, 1936).

O solo foi classificado como Latossolo Bruno Alumínico típico após descrição morfológica e classificação de um perfil localizado na área das coletas com altitude 740 m, 28°16'0.408 "S, 52°1'57.396" W, de acordo com Santos et al., (2018).

Figura 1 - Perfil de solo utilizado para descrição. Passo Fundo, RS – 2022.



Fonte: DALACORTE (2022)

Tabela 2: Descrição de perfil do solo avaliado e principais atributos morfológicos de solos desenvolvidos em área natural de Água Santa. Passo Fundo – RS, 2022.

Perfil	Vegetação	Classe	Altitude (m)	Coordenadas geográficas		
1	Campo Nativo	Latossolo	740	28°16'0.408"S 52°1'57.396"W		
		Cor Munsell	Consistência			
Horiz.	Prof. (cm)	Matriz	Estrutura ⁽¹⁾	Seca ⁽²⁾	Úmida ⁽³⁾	Molhada ⁽⁴⁾
A	0 - 40	7.5YR 3/2, úmida	M, M/P, BS/G	D	F	PL e Pe
AB	40-70	7.5YR 3/3, úmida	M, M/P, BS/G	D	F	PL E Pe
B	70 - 130	7.5YR 3/3, úmida	M, M/P, BS/G	D	F	PL e Pe
C	130+	-	-	-	-	-

Fonte: DALACORTE (2022)

- (1) Estrutura: grau de desenvolvimento (F: fraco M: moderado), tamanho (MP: muito pequeno, P: pequeno, M: médio), tipo (G: granular, BS: blocos subangulares, BA: blocos angulares). (2) Consistência no estado seco (LD: ligeiramente dura, D: dura). (3) Consistência no estado úmido (MF: muito friável, F: friável). (4) Consistência no estado molhado (PL: plástico, LPL: ligeiramente plástica, LPe: ligeiramente pegajosa, Pe: pegajosa).

Tabela 3: Teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e manganês de campo nativo e lavouras cultivadas por 2, 8 e 40 anos avaliadas na profundidade 0-20 cm. Passo Fundo – RS, 2018.

Tratamentos	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mn ²⁺
	mg/kg		cmol _c /kg		g/kg
Campo Nativo	7,17	67,01	1,1	1,6	110,6
Lavoura 2 anos	21,03	131,10	3,3	6,6	109,3
Lavoura 8 anos	63,57	247,19	2,2	3,5	132,6
Lavoura 40 anos	49,20	126,34	4,3	7,6	43,9

Fonte: DALACORTE (2022)

3.2 Tratamentos

O levantamento dos dados é composto por uma classe de solo: Latossolo, dois usos (campo nativo e lavoura) e três tempos de cultivo agrícola para as lavouras (histórico de 2 anos, 8 anos e 40 anos).

O histórico das áreas de lavoura no verão é a produção anual de soja (*Glycine max* L.). No inverno o manejo é visando a alimentação animal de gado de corte com produção de aveia (*Avena sativa*) e azevém (*Lolium multiflorum*) utilizados como pastagem.

A adubação da área é realizada com 300 kg ha⁻¹ da fórmula 02-20-30 e a calagem é feita conforme resultados de análises a cada 5 anos, com uma média de aplicação de 2 ton ha⁻¹ de calcário.

3.3 Coleta de amostras de solo

A amostragem do solo foi realizada em 17 de janeiro de 2018 em todos os tratamentos. As coletadas foram realizadas com trado tipo calador de 0 a 20 cm, com 4 repetições para cada tratamento. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas ao laboratório de Uso e Manejo do Território e dos Recursos Naturais da Universidade de Passo Fundo para a realização das análises.

3.4 Análises

3.4.1 Extração sequencial do silício

O solo foi seco em estufa à 45 °C, triturado e peneirado em peneira de 2 mm, formando a terra fina seca ao ar (TFSA).

As formas de silício extraídas foram: móvel, adsorvida, adsorvida na matéria orgânica do solo, oclusa em sesquióxidos de Fe e Al e a sílica amorfa total (biogênica e mineral). As análises foram realizadas com quatro repetições de campo e as análises laboratoriais em triplicata. A extração sequencial ou fracionamento de silício foi realizada através do método de fracionamento estudado por Georgiadis et al. (2011).

O primeiro passo do fracionamento foi pesar duas gramas de solo e colocar em tubos Falcon de polipropileno de 50 mL. Esse será o solo e o tubo utilizado durante todo o processo de extração sequencial descrito a seguir.

a) Silício móvel (Si)

Duas gramas de solo (TFSA) foram colocadas em tubos Falcon de 50 mL. Adicionou-se 10 mL de uma solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ na proporção solo:solução de 1:5. A solução extratora ficou em contato com o solo durante 24 horas. Conforme adaptado de Georgiadis (2011) as agitações horizontais ocorreram durante 1 minuto 24 vezes, totalizando 24 agitações distribuídas nas 24 horas com uma rotação de 150 rpm (GEORGIADIS, 2011). Após o processo de extração, as amostras foram centrifugadas durante 10 minutos a 151,2 g. A solução foi então filtrada (HAYSOM; CHAMPMAN, 1975; GEORGIADIS, 2011) e a dosagem foi realizada por colorimetria pelo método azul de molibdênio em um comprimento de onda de 660 nm (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004).

Após a primeira extração, o solo foi lavado e preparado para a segunda fração. O processo de lavagem tem como objetivo retirar resíduos da solução extratora anterior e é realizado duas vezes após cada extração. A lavagem do solo ocorreu da seguinte forma: foram adicionados 40 mL de água destilada nas amostras, feita uma agitação horizontal durante dois minutos e uma centrifugação a 3.000 rpm (151,2 g) durante 10 minutos. A água foi descartada e o solo foi colocado em uma estufa com ventilação em uma temperatura de $45 \text{ }^\circ\text{C}$ até secar e pesado para a extração da próxima fração (GEORGIADIS, 2011).

b) Silício adsorvido (Si_{ad})

O silício adsorvido no solo foi a segunda fração extraída no método sequencial. Para esta fração foi adicionado nos frascos e solos depois da lavagem após 1ª extração, uma solução de ácido acético $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ em uma proporção solo:solução de 1:10. Conforme adaptado de Georgiadis (2011) a solução extratora ficou em contato com o solo durante 24 horas sendo que neste período foram realizadas 24 agitações horizontais de 1 minuto com rotação de 150 rpm (SNYDER, 2001; GEORGIADIS, 2011). Após o processo de extração, a dosagem de Si seguiu o descrito anteriormente bem como a lavagem.

c) Silício associado à matéria orgânica do solo (Si_{org})

Na terceira extração foi extraído o silício associado à matéria orgânica do solo. Para isso, pegou-se o frasco com solos da 2ª extração e foi adicionado 20 mL de peróxido de hidrogênio 17,5%. As amostras foram então deixadas em repouso durante 1 hora, tampadas (sem rosquear), sendo realizadas 5 agitações manuais durante esse período. Após isso, as amostras receberam 10 mL de peróxido de hidrogênio a 35%. E a extração aconteceu em proporção 1:30 de solo:solução. As amostras foram cobertas novamente e aquecidas a 85 °C até a reação da queima da matéria orgânica finalizar (SCHILICHTING, 1995; GEORGIADIS, 2011). As amostras foram centrífugas durante 10 minutos a 3.000 rpm (151,2 g), a solução foi filtrada e a determinação da quantidade do elemento foi realizada através do ICP em um comprimento de onda de 251,611 nm. O processo de lavagem e preparo foi repetido como descrito anteriormente a fim de efetuar a próxima extração.

d) Silício ocluso em sesquióxidos de Fe e Al (Si_{occ})

A quarta fração foi a do Si ocluso em sesquióxidos de Fe e Al. Para isso, foi feita uma solução de oxalato de amônio $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ com ajuste de pH a 3,0 realizado com uma solução de ácido oxálico foi adicionada nos frascos e solos após a 3ª fração. A proporção solo:solução utilizada foi de 1:50. As amostras de solo dentro dos frascos de 50 mL foram envolvidas com papel alumínio para que não houvesse contato com a luz e foram agitadas horizontalmente durante 2 horas a 150 rpm (TAMM, 1932; SCHWERTMANN, 1964; GEORGIADIS, 2011). Após o processo de extração, as amostras foram centrifugadas durante 10 minutos a 3.000 rpm (151,2 g), a solução foi filtrada (GEORGIADIS, 2011) e a determinação da quantidade do elemento foi realizada através do ICP em um comprimento de onda de 251,611 nm. Com o solo foi repetido o processo anterior de lavagem e preparo para a extração da próxima fração.

e) Sílica amorfa (Si_{ta})

A quinta fração do processo de extração sequencial foi a da sílica amorfa e ela foi realizada usando-se uma solução de hidróxido de sódio a $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ em uma proporção solo:solução de 1:400. Após adição da solução extratora, conforme adaptado de

Georgiadis (2011) as amostras foram colocadas em agitador horizontal a 150 rpm e banho-maria a 85 °C intercaladamente durante 6 horas. Após o processo de extração, as amostras foram centrifugadas durante 10 minutos a 3.000 rpm (151,2 g), a solução foi filtrada (GEORGIADIS, 2011) e a determinação da quantidade do elemento foi realizada através do ICP em um comprimento de onda de 251,611 nm. Após esta extração o solo foi descartado.

f) Silício total (SiO₂)

O Si total (Si_{tot}) na forma de óxido de Si foi determinado por fluorescência de raios-X por energia dispersiva usando-se um FRX modelo Bruker S2 Ranger com gerador de alta tensão máxima de 50W, tensão e intensidade de potência de 50 KV, corrente de 2 mA, com tubo de raios X de material anódico (Pd - Chumbo). O equipamento possui um detector tipo XFLASH com resolução de 129 eV e janela Berílio, operação no ar, He e vácuo, e analisa desde o elemento Na (Sódio) até o U (Urânio) (BROKER, 2010). A partir dos valores de óxidos, calculou-se a massa do silício.

g) Porcentagem das frações de Si em relação à soma das frações extraídas quimicamente

A porcentagem de cada fração de Si foi calculada usando a soma das frações de Si extraídas quimicamente como o valor de 100%. O teor quantificado para cada fração apresentou uma porcentagem em relação a soma das frações.

3.4.2 Métodos de determinação de silício no solo

a) Método colorimétrico

Para a determinação do teor de Si nas frações móvel e adsorvida extraídas do solo foi utilizado o método colorimétrico. Assim, foram pipetadas uma alíquota de 10 mL do extrato de cada amostra e dos padrões e colocadas em um copo plástico de 50 mL (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004).

Para fazer os padrões de Si foram pipetados 0, 2, 5 e 10 mL de uma solução padrão de 20 mg L⁻¹ de Si e colocados em balões volumétricos de 100 mL, os quais foram preenchidos com água destilada (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004).

Nas alíquotas pipetadas foram adicionados 1 mL da solução sulfo-molíbdica, que reagiu com o Si e desenvolveu cor amarela. Após 10 minutos foram acrescentados 2 mL da solução de ácido tartárico 200 g.L⁻¹, o qual complexa o fósforo da solução (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004).

Após 5 minutos foram adicionados 10 mL da solução de ácido ascórbico, a qual reduziu o Si da cor amarela para cor azul e depois de 1 hora foram realizadas a leitura em Espectrofotômetro UV-Visível (Pró-análise) no comprimento de onda de 660 nm (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004).

b) Espectrometria de emissão óptica com plasmas indutivamente acoplado (ICP-OES)

Para a determinação do Si extraído das frações do elemento associado à matéria orgânica do solo, ocluso nos sesquióxidos de Fe e Al e sílica amorfa, foi utilizado o método ICP – OES.

No equipamento a amostra é colocada em um sistema denominado de introdução de amostras, depois é seca, atomizada e excitada no plasma. Assim, a identificação qualitativa se dá através da identificação da presença de linhas de emissão características do elemento de interesse. De maneira geral, pelo menos três linhas são consideradas para confirmação da presença do elemento. Já a quantificação dos elementos em uma amostra desconhecida é feita comparando os sinais dos íons com o sinal de curvas analíticas ou padrões de referência. Essas curvas podem ter faixa de trabalho linear de até 6 ordens de grandeza e a perda da linearidade em altas concentrações é resultado de processos de auto absorção (COLZATO, 2020).

Para esse método de leitura, após a extração do elemento, o líquido extraído deve ser filtrado para evitar a presença de qualquer sólido na amostra e de forma de leitura direta.

3.4.3 Soluções usadas

3.4.3.1 Solução para extração

a) Solução I: cloreto de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$. Pesar cloreto de cálcio di-hidratado e colocar em balão volumétrico de 1L. Completar o volume do balão com água destilada (GEORGIADIS, 2011).

b) Solução II: ácido acético $0,01 \text{ mol L}^{-1}$. Pipetar ácido acético e colocar em balão volumétrico de 1L. Completar o volume do balão com água destilada (GEORGIADIS, 2011).

c) Solução III: Peróxido de hidrogênio 17,5% e 35% (GEORGIADIS, 2011).

d) Solução IV: Pesar 28,4g de oxalato de amônio monohidratado + 17,56 g de ácido oxálico dihidratado. Colocar em balão volumétrico de 1L e completar o volume do balão com água destilada (GEORGIADIS, 2011).

e) Solução V: Pesar 8g de hidróxido de sódio $0,2 \text{ mol L}^{-1}$. Adicionar em balão volumétrico de 1L e completar o volume do balão com água destilada (GEORGIADIS, 2011).

3.4.3.2 Soluções método colorimétrico

a) Solução Padrão de Si (20 mg L^{-1}): adicionar 4 mL de solução padrão 1.000 ppm de Si em balão de 200 mL e completar com água destilada (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004).

b) Solução de ácido ascórbico 3 g L⁻¹: dissolver 0,3 g de ácido ascórbico (C₆H₈O₆) p.a. em 50 mL de água destilada. Transferir a solução para balão volumétrico de 100 mL e completar com água destilado (esta solução deve ser preparada toda vez que for usado) (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004).

c) Solução sulfo-molíbdica 75 g L⁻¹: dissolver 7,5 g de molibdato de amônio [(NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O] em 75 mL de água destilada. Adicionar 10 mL de ac. sulfúrico 18N (500 g L⁻¹). Transferir a solução para balão de 100 mL e completar com água destilada. (Esta solução deve ser preparada em recipiente de prolipropileno para evitar extração de Si do vidro do balão volumétrico quando a solução reage) (KORNDÖRFER, PEREIRA; NOLLA, 2004).

d) Solução de ácido tartárico 200 g L⁻¹: dissolver 20 g de ácido tartárico em 50 mL de água destilada. Transferir a solução para balão de 100 mL e completar com água destilada (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004).

3.4.4 Caracterização química do solo

O teor de matéria orgânica do solo foi determinado de acordo com Embrapa (2011), os índices de pH e SMP e os teores de P, K, Ca, Mg, Mn e Al foram determinadas de acordo com Tedesco et al. (1995) (DALACORTE, 2021).

3.4.5 Granulometria do solo

Ao observar os resultados da extração sequencial de Si, foi optado por seguir as demais análises apenas com os tratamentos de campo nativo e lavoura de 40 anos, pois foram os tratamentos que apresentaram diferença significativa entre si para algumas variáveis analisadas anteriormente.

a) Distribuição do tamanho de partículas do solo inteiro: método tradicional

A análise granulométrica foi realizada nos tratamentos de campo nativo e lavoura de 40 anos, utilizando o método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986). As amostras de TFSA (40 gramas) foram submetidas à dispersão química ($\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1} + \text{NaPO}_3 \text{ } 0,07 \text{ mol L}^{-1}$) e mecânica (agitação por 16 h em agitador horizontal). Em seguida, as frações de areia ($> 0,053 \text{ mm}$) foram obtidas por peneiramento e as frações de silte ($0,002 - 0,053 \text{ mm}$) e a argila ($< 0,002 \text{ mm}$) foram obtidas através do método da pipeta pesando-se as frações após secagem em estufa com ventilação.

A fração areia foi ainda seca e após isso peneirada conforme as classes de areia para então ser definida a quantidade de areia muito grossa ($2,0 - 1,0 \text{ mm}$), grossa ($1,0 - 0,5 \text{ mm}$), média ($0,5 - 0,25 \text{ mm}$), fina ($0,25 - 0,10 \text{ mm}$) e muito fina ($0,10 - 0,05 \text{ mm}$) (USDA, 1951) presente nos tratamentos de campo nativo e lavoura de 40 anos.

b) Distribuição do tamanho de partículas do solo inteiro: método da difração a laser

A análise de tamanho de partícula foi realizada através do método de difratometria laser (DL) através do Bettersizer S2-WD(DRY) com o sistema de dispersão via úmida.

Esse método se baseia no princípio da difração da luz laser, para construir diagramas de difração de cada partícula e estimar o tamanho dela na amostra. Se pressupõe que as partículas interagem com o feixe de luz e provem um diagrama de luz intrínseco ao seu tamanho (BORTOLUZZI; POLETO, 2013).

Para se obter o resultado das análises basta adicionar solo no equipamento até completar a necessidade dele para o tipo de material que está sendo analisado – para isso existe um indicativo na tela do computador que mostra através da cor quando foi adicionado material suficiente no equipamento -, no equipamento e através da dispersão que ocorre dentro dele, é realizada a determinação da faixa de tamanho de partícula de $0,1 \text{ um}$ até 2000 um presente na amostra. Assim, é de cada amostra. A análise já é realizada em triplicada pelo equipamento.

3.4.6 Caracterização da mineralogia do solo

Com o intuito de conhecer a mineralogia do campo nativo e da lavoura de 40 anos e as possíveis alterações na mineralogia em função da retirada do Si do solo foram realizadas análises de difração de raios-X - DRX. Para isso escolheu-se suspensões de material após a extração de Si ocluso nos sesquióxidos de Fe e Al e sílica amorfa nas amostras de CN e lavoura de 40 anos, pois entendemos que são essas frações de Si que, ao terem seus teores diminuídos no solo, podem levar às alterações da mineralogia. As extrações foram realizadas conforme as metodologias citadas anteriormente para as respectivas frações. Para isso, partiu-se de suspensões de solo fração total, onde confeccionaram-se lâminas em depósito orientado.

As lâminas foram confeccionadas da seguinte forma: 3 mL de suspensão de solo (a saturação catiônica natural) foi colocado com micropipeta sobre a lâmina e estas deixadas secar ao ar, protegidas da poeira.

Além disso, as lâminas foram submetidas a cinco pré-tratamentos: primeiramente foram passadas no DRX em condição natural (air dried - N) (temperatura ambiente), após isso as lâminas foram colocadas dentro de um dessecador com etileno glicol (EG) e mantidas a vácuo durante 24 horas, após isso foi realizada a leitura no equipamento. E por fim, uma lâmina de cada tratamento de solo foi submetidas ao tratamento térmico: colocadas em um forno com temperatura de 250 °C (250) durante 3 horas e após esfriarem foram submetidas ao DRX. Essas mesmas lâminas foram colocadas no forno em temperaturas de 350 °C (350) e 550 °C (550) repetindo o processo. Os minerais e argilominerais foram identificados pela interpretação dos gráficos de DRX, conforme Brindley & Brawn (1980).

3.5 Análise estatística

Os dados das variáveis Si_l , Si_{ad} , Si_{org} , Si_{occ} , Si_{ta} , Si_{ft} , Si_{tot} , Si_{bal} , frações de areia, silte e argila, classes de areia muito grossa, grossa, média, fina e muito fina foram tratados através do modelo linear a 5%. Quando Pr (>F) apresentou valor significativo

para as variáveis, foi realizada a comparação de médias através do teste Tukey a 5% ($p < 0,05$) de probabilidade de erro.

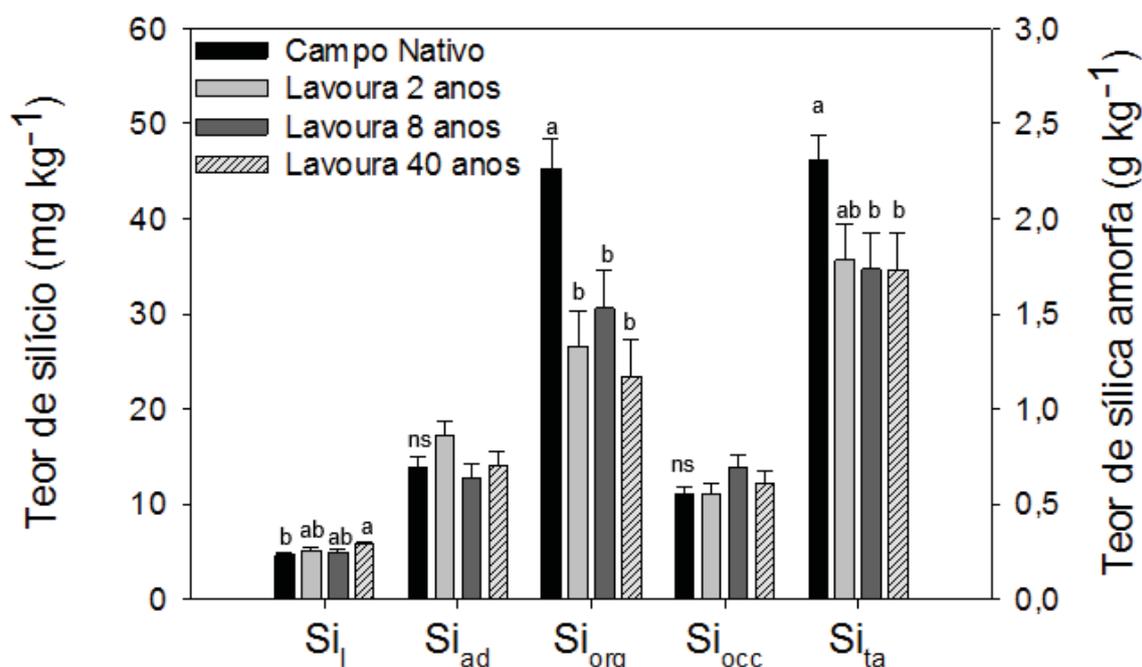
Já a granulometria a laser foi comparada nas figuras e se considerou diferente um tratamento do outro quando os desvios padrões não se encontravam.

4 RESULTADOS

4.1 Extração sequencial do silício

Na figura 2 estão os valores de Si extraídos por diferentes extratores em diferentes usos do solo.

Figura 2 - Teores de silício encontrado em suas diferentes formas em solos de campo nativo e lavouras de 2, 8 e 40 anos. Passo Fundo – RS, 2022.



Si_i: Si móvel, Si_{ad}: Si adsorvido, Si_{org}: Si associado à matéria orgânica do solo, Si_{occ}: Si ocluído em sesquióxidos de Fe e Al, Si_{ta}: sílica amorfa total.

Médias com letras diferentes na mesma variável analisada apresentam diferença significativa entre os tratamentos avaliados usando-se o teste Tukey a $P < 0,05$ de probabilidade de erro.

ns: os tratamentos não apresentam diferença significativa entre os tratamentos avaliados para a mesma variável analisada.

Para a fração de silício móvel (Si_i) o campo nativo e a lavoura de 40 anos se diferem significativamente, sendo maior a quantidade de Si_i na lavoura de 40 anos do que no campo nativo. As lavouras de 2 e 8 anos não diferem do campo nativo e da lavoura de 40 anos para essa variável (figura 2).

Os resultados relacionados a fração de Si adsorvido não apresentam diferenças significativas entre os tratamentos avaliados.

O Si associado a matéria orgânica do solo apresentou maior teor no campo nativo (figura 2) se diferenciando significativa da lavoura de 2, 8 e 40 anos.

O Si ocluso em sesquióxidos de Fe e Al não apresentou diferença significativa entre os tratamentos (figura 2). Esse resultado demonstra estabilidade dessa fração em relação aos usos e históricos de uso.

A fração de sílica amorfa apresentou diferença significativa entre o campo nativo e as lavouras de 8 e 40 anos (figura 2). A lavoura de 2 anos não se diferiu significativamente dos demais tratamentos (figura 2).

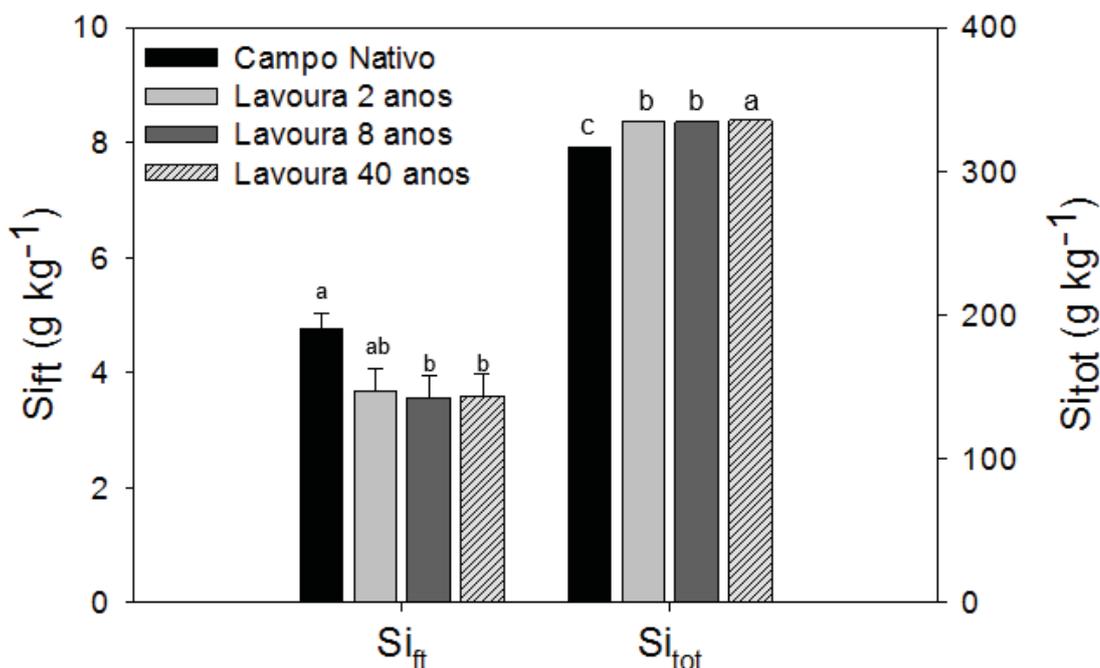
4.2 Soma das frações de Si e teor total do elemento

A soma das frações de Si extraídas (Si_{ft}) se diferiu significativamente entre o campo nativo e as lavouras de 8 e 40 anos (figura 3). A lavoura de 2 anos não se diferiu significativamente dos demais tratamentos (figura 3).

O teor de Si total dos solos apresentou diferença significativa entre os tratamentos avaliados (figura 3). Sendo que o maior teor de Si foi encontrado na lavoura de 40 anos, e o menor teor do elemento foi encontrado no campo nativo elemento.

A figura 3 nos permite comparar o teor de Si total quantificado através do FRX com as frações de Si extraídas quimicamente. Essa comparação nos mostra como o teor do elemento que compõem as frações extraídas quimicamente é bem inferior ao teor de Si total encontrado no solo por fluorescência de raios-X.

Figura 3 - Soma das frações de Si encontrada em suas diferentes formas em solos e Si total de campo nativo e lavouras de 2, 8 e 40 anos. Passo Fundo – RS, 2022.



Si_{ft} : Soma das frações de Si extraídas sequencialmente, Si_{tot} : Teor de Si total presente nos solos. Médias com letras diferentes na mesma variável analisada apresentam diferença significativa entre os tratamentos avaliados usando-se o teste Tukey a $P < 0,05$ de probabilidade de erro. ns: os tratamentos não apresentam diferença significativa entre os tratamentos avaliados para a mesma variável analisada.

Tabela 4: Porcentagem que cada fração de Si representa em relação ao total extraído quimicamente. Passo Fundo – RS, 2022.

Tratamentos	Si_l	Si_{ad}	Si_{org}	Si_{occ}	Si_{ta}
			%		
Campo Nativo	0,21	0,58	1,90	0,47	96,84
Lavoura 2 anos	0,28	0,94	1,44	0,59	96,75
Lavoura 8 anos	0,26	0,71	1,70	0,77	96,56
Lavoura 40 anos	0,33	0,79	1,32	0,69	96,87

Si_l : Si móvel, Si_{ad} : Si adsorvido, Si_{org} : Si associado à matéria orgânica do solo, Si_{occ} : Si ocluso em sesquióxidos de Fe e Al, Si_{ta} : Sílica amorfa total.

A tabela 4 nos mostra o quanto cada fração de Si representa em relação ao total extraído pelo método do fracionamento. A fração de si_{ta} é a que compõem a maior quantidade das formas de Si que extraímos quimicamente, representando mais de 90% do teor de Si. Já a fração de Si_l é a forma de Si que representa a menor quantidade de Si no

solo. Assim, a forma de Si disponível no solo para as plantas é a menor, se tornando necessário que ocorra dissolução das demais formas de Si para repor o Si exportado via grão na colheita e manter os níveis do elemento no solo disponível para as plantas sucessivas.

Para todos os tratamentos, 96% do Si extraído quimicamente está ligado a fase sólida na forma de sílica amorfa. As demais frações compõem em torno de 4% das fases de Si encontrada no solo. O teor de Si presente na solução do solo na forma de Si móvel representa respectivamente 0,21%, 0,28%, 0,26% e 0,33% do valor de Si total para os tratamentos de campo nativo, lavoura de 2 anos, lavoura de 8 anos e lavoura de 40 anos. Ou seja, de todo Si extraído e quantificado através do fracionamento, apenas essa pequena porcentagem está presente na solução do solo.

4.3 Caracterização química do solo

Tabela 5: Caracterização de pH e matéria orgânica dos solos de campo nativo e lavoura de 2, 8 e 40 anos. Passo Fundo – RS, 2018.

Tratamentos	pH	Matéria orgânica (g kg ⁻¹)
Campo Nativo	4,42 b	46,12 a
Lavoura 2 anos	4,66 b	46,65 a
Lavoura 8 anos	4,45 b	46,28 a
Lavoura 40 anos	5,29 a	42,60 b

Fonte: DALACORTE (2022)

Para a variável pH o solo da lavoura de 40 anos apresentou o maior valor diferindo significativamente dos demais tratamentos. Já para o teor de matéria orgânica do solo a lavoura de 40 anos apresentou a menor quantidade, se diferindo estatisticamente dos demais tratamentos.

4.4 Granulometria do solo

a) Distribuição do tamanho de partículas do solo interior: método tradicional

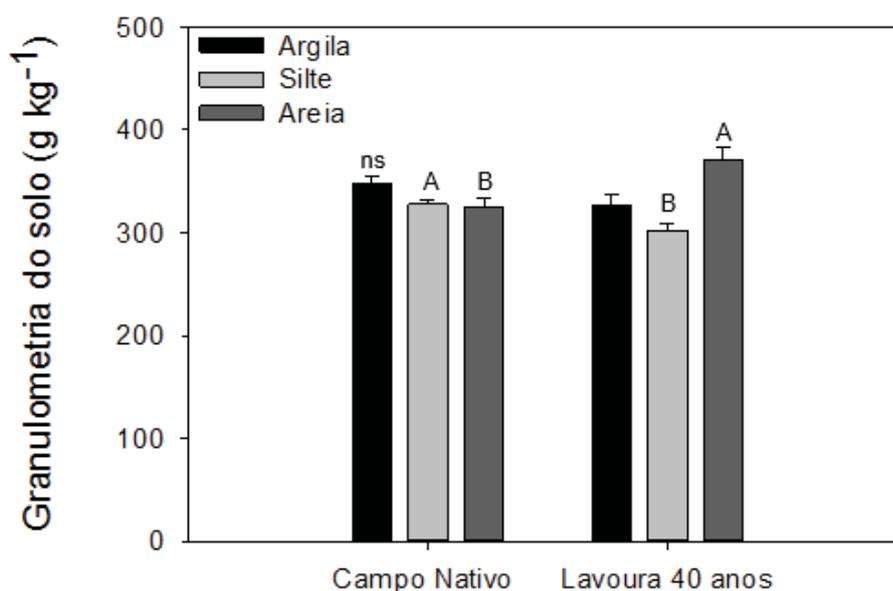
Na figura 4 estão os valores das frações de argila, silte e areia apenas para os solos de campo nativo e lavoura de 40 anos.

A fração areia apresentou maior valor para a lavoura de 40 anos (figura 4). O silte apresentou maior valor para o campo nativo (figura 4). Já a fração argila não apresentou diferença significativa entre os tratamentos avaliados (figura 4).

Na figura 5 estão os valores encontrados para as diferentes classes de areia que compõem os solos dos tratamentos de campo nativo e lavoura de 40 anos.

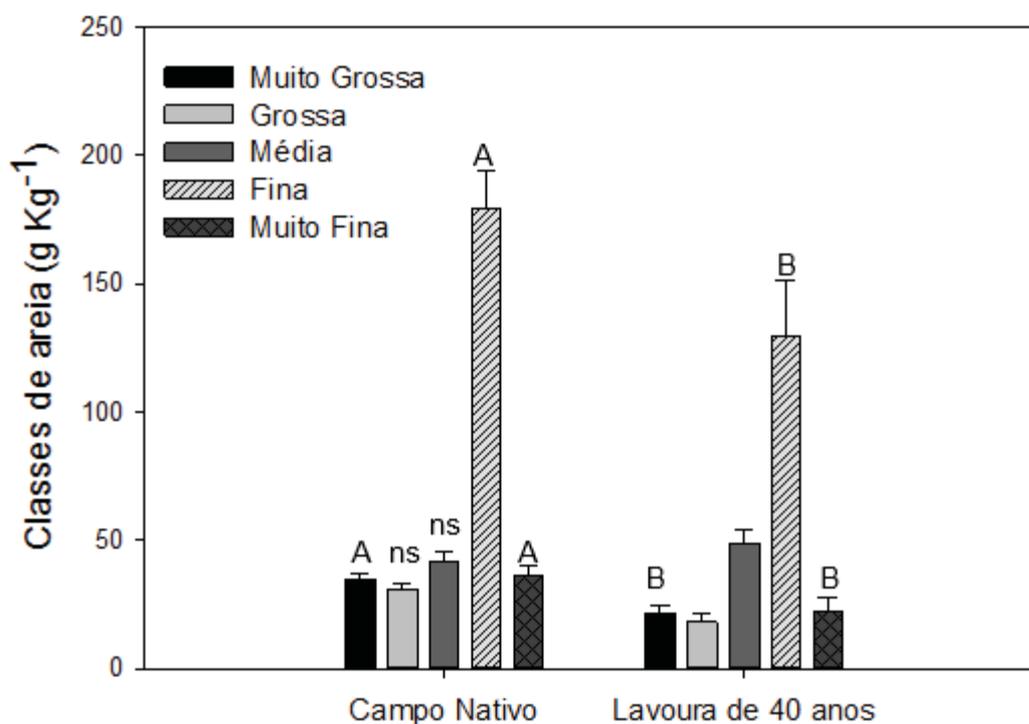
As diferentes classes de areia: muito grossa, fina e muito fina apresentaram diferença significativa entre os tratamentos de campo nativo e lavoura de 40 anos, sendo seu maior valor encontrado no campo nativo. Já para as classes de areia grossa e média não houve diferença significativa entre os tratamentos (figura 5).

Figura 4 - Teores das frações de areia, silte e argila que compõem os solos de campo nativo e lavoura de 40 anos. Passo Fundo – RS, 2022.



Médias com letras maiúsculas diferentes apresentam diferença significativa entre os tratamentos avaliados para as variáveis analisadas, usando-se o teste Tukey a $P < 0,05$ de probabilidade de erro.
ns: não há diferença significativa para a variável analisada entre os tratamentos avaliados.

Figura 5 - Teores das classes de areia que compõem os solos de campo nativo e lavoura de 40 anos. Passo Fundo – RS, 2022.



Médias com letras maiúsculas diferentes apresentam diferença significativa entre os tratamentos avaliados para as variáveis analisadas, usando-se o teste Tukey a $P < 0,05$ de probabilidade de erro.

ns: não há diferença significativa para a variável analisada entre os tratamentos avaliados.

b) Distribuição do tamanho de partículas do solo inteiro: método da difração a laser

Tanto para o campo nativo como para a lavoura de 40 anos menores tamanhos de partícula foram detectados em $0,7525 \mu\text{m}$ e o pico com maiores tamanhos de partícula ficou em $1063,00 \mu\text{m}$.

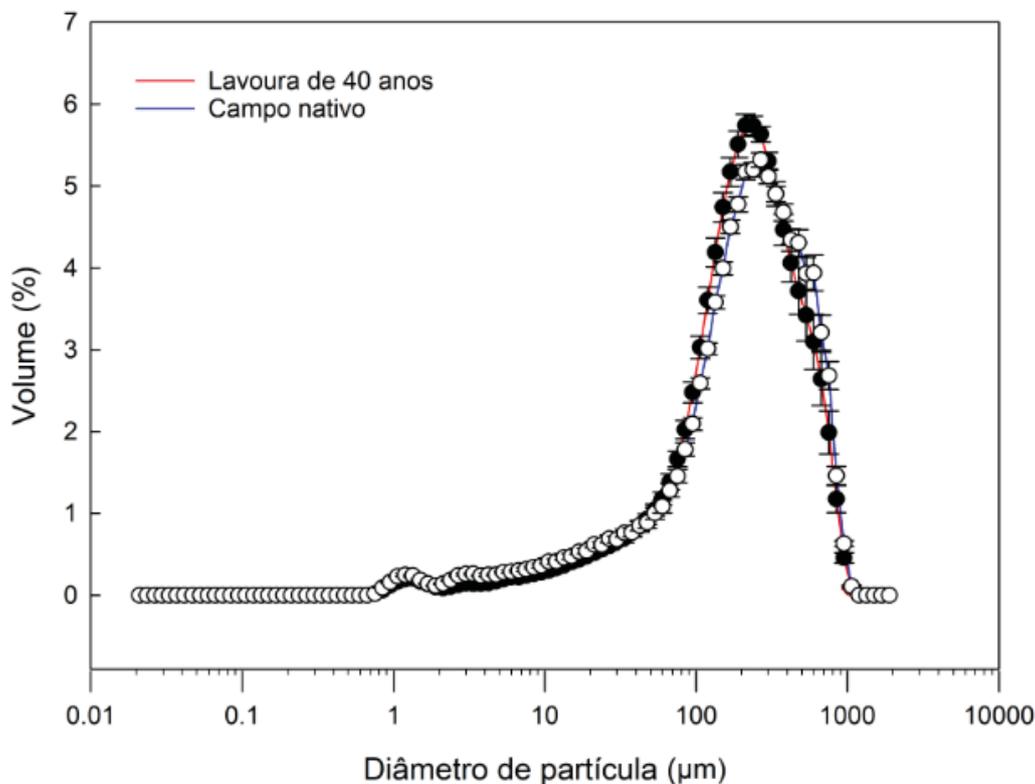
O campo nativo apresentou valor de D10 em $23,00 \mu\text{m}$, o D50 no tamanho de $229,53 \mu\text{m}$ e o D90 apresentou valor de $608,13 \mu\text{m}$ (tabela 6). Isso significa que 10% das partículas do tratamento de campo nativo têm seu tamanho até o valor de $23,00 \mu\text{m}$, 50% das partículas têm seu tamanho até $229,53 \mu\text{m}$ e 90% das partículas têm o tamanho até $608,13 \mu\text{m}$, de forma acumulada.

Tabela 6: Diâmetro de partículas que compõem as porcentagens D10, D50 e D90 da amostra. Passo Fundo, RS – 2022.

Tratamentos	D10	D50	D90
		%	
Campo Nativo	23,00 μm	229,53 μm	608,13 μm
Lavoura 40 anos	41,36 μm	210,1 μm	550,63 μm

O valor de D10 da lavoura de 40 anos foi de 41,36 μm , o D50 foi de 210,1 μm e o D90 foi de 550,63 μm , sendo esse o indicativo de forma acumulativa da porcentagem das amostras que compõem os tamanhos de partícula (tabela 6). Os difratogramas lasers mostram que as partículas do campo nativo se encontram em maior quantidade para D50 e D90 do que as partículas da lavoura de 40 anos, que se encontram em maior quantidade para D10 do que o campo nativo.

Figura 6 - Diagramas de difração a laser representando a distribuição do tamanho de partículas em percentual de seus volumes da fração total de solo de campo nativo e lavoura de 40 anos. Passo Fundo – RS, 2022.



4.5 Mineralogia do solo

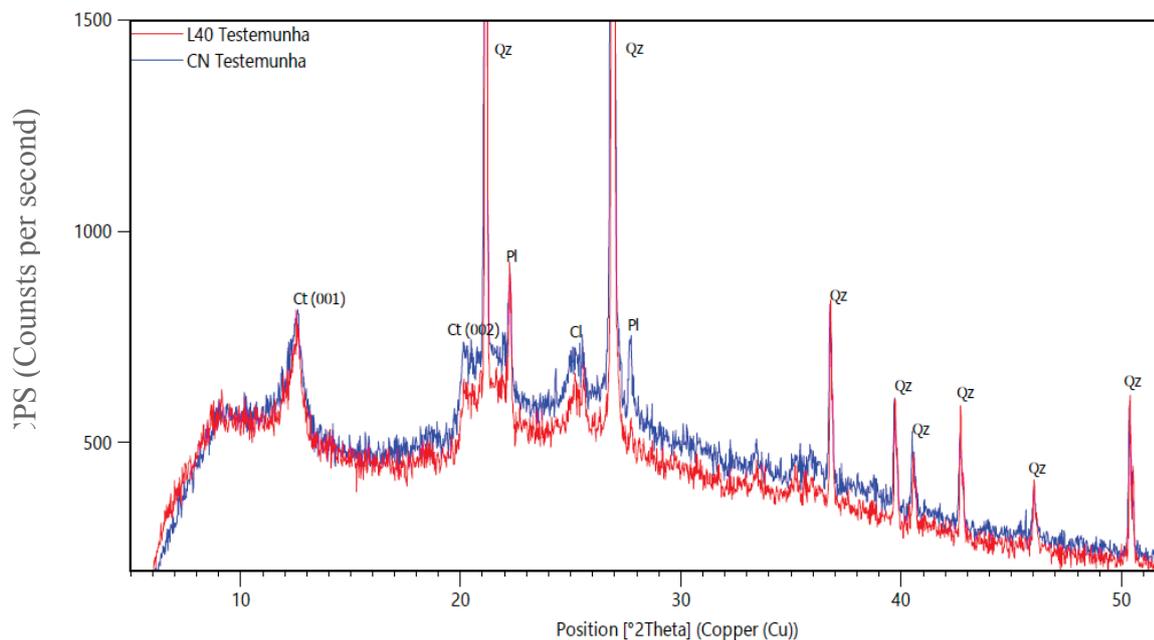
A mineralogia do solo foi estudada em detalhe apenas para o campo nativo (CN) e a lavoura de 40 anos (L40) (Figura 7). Ao comparar visualmente (posição de picos e tamanho de picos) ambos os tratamentos apontaram uma assembleia mineralógica similar, indicando não haver alteração na mineralogia do solo no período de 40 anos de cultivo de soja. Os minerais observados nesses tratamentos foram: Ct (caulinita), Qz (quartzo) e Pl (plagioclásio).

Quanto a composição e comportamento mineralógico do solo após a eliminação do Si ocluso e Si amorfa tem-se para os dois tratamentos (campo nativo e lavoura de 40 anos) conforme a figura 8 e 9, alterações mineralógicas visíveis. Ao executar a extração do Si ocluso dos sesquióxidos de Fe e Al nota-se o surgimento do pico correspondente a mica (mc) e a hematita (hm), os quais anteriormente não foram identificados. Isso é explicado devido a maior exposição dos picos de mica e hematita depois da retirada de Si de óxidos e provavelmente da fração areia fina. Já quando extraímos a sílica amorfa, percebe-se que a maior parte dos minerais de argila não aparecem mais, permanecendo apenas o quartzo que estava em maior intensidade nos outros tratamentos.

Após a extração química da sílica amorfa, seguimos com a interpretação dos difratogramas com os tratamentos feitos nas lâminas. Para isso, usamos o tratamento de campo nativo e lavoura de 40 anos sem extração química laboratorial e o campo nativo e lavoura de 40 anos com extração de sílica amorfa (figuras 10, 11, 12 e 13).

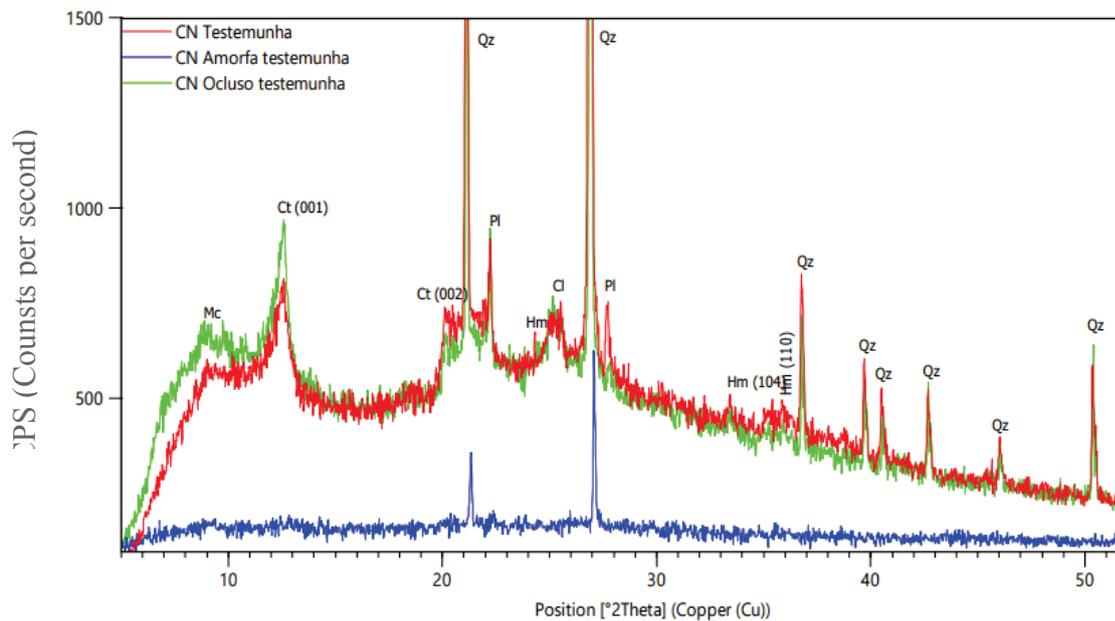
Pode-se observar que o tratamento nas lâminas tanto do campo nativo e lavoura de 40 anos como com extração de sílica amorfa possibilitou a identificação de mais minerais que estão presente no solo. Entre eles estão: caulinita, quartzo, plagioclásio, hematita, halita, feldspato potássico e anatásio. Ao retirarmos a sílica amorfa notamos que há diminuição da intensidade dos picos e a identificação de mica e caulinita.

Figura 7: Análise de DRX de solos em condição natural de campo nativo e lavoura de 40 anos. Passo Fundo – RS, 2022.



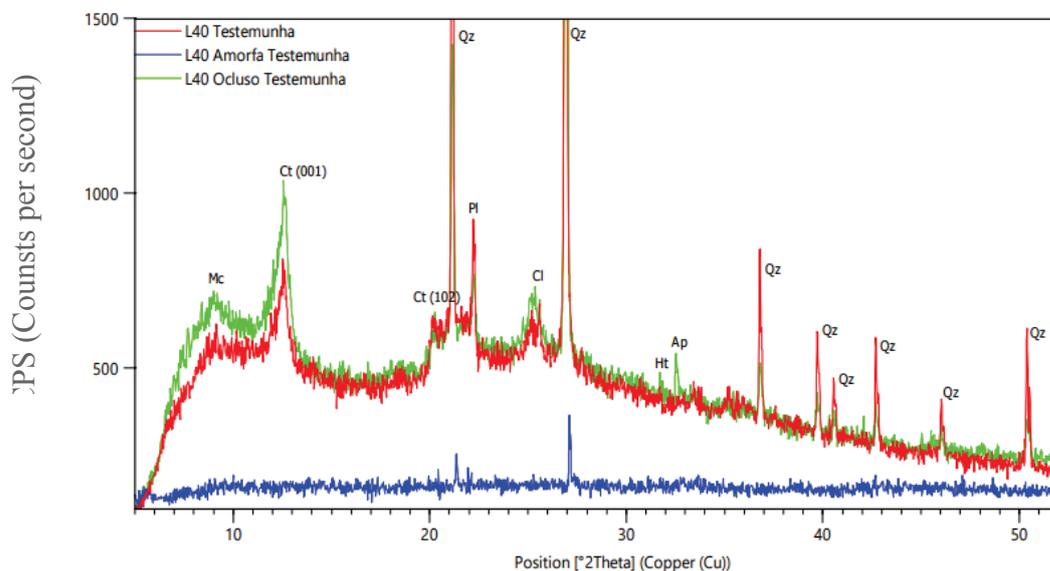
CN: Campo nativo; L40: Lavoura de 40 anos; Testemunha: solo em condição natural de campo, sem extração química de Si realizada em laboratório e sem tratamento nas lâminas analisadas. Ca: caulinita; Qz: quartzo; Pl: plagioclásio.

Figura 8: Análise de DRX em solos de campo nativo em condição natural, com extração de Si ocluso em sesquióxidos de Fe e Al e sílica amorfa. Passo Fundo – RS, 2022.



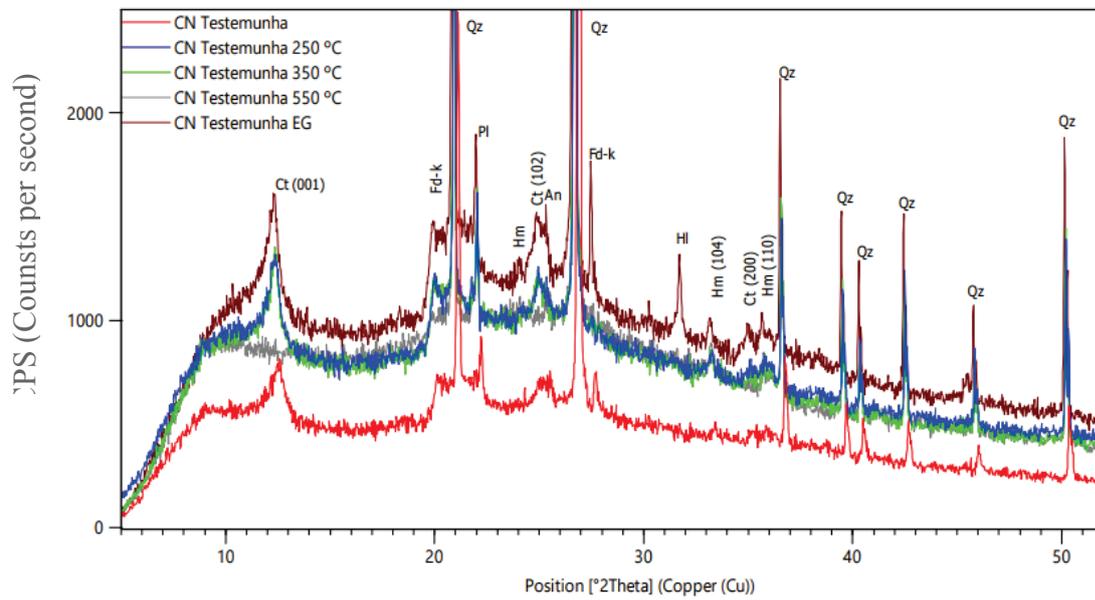
CN: Campo nativo; Testemunha: solo em condição natural de campo, sem extração química de Si realizada em laboratório; CN amorfa: solo com extração química de sílica amorfa realizada em laboratório. CN ocluso: solo com extração química realizado em laboratório de Si presente nos sesquióxidos de Fe e Al; testemunha: lâminas sem tratamentos. Mc: mica; Ct: caulinita; Pl: plagioclásio; Hm: hematia; Hl: halita; Qz: Quartzo.

Figura 9: Análise de DRX em solos de lavoura de 40 anos em condição natural, com extração de Si ocluso em sesquióxidos de Fe e Al e sílica amorfa. Passo Fundo – RS, 2022.



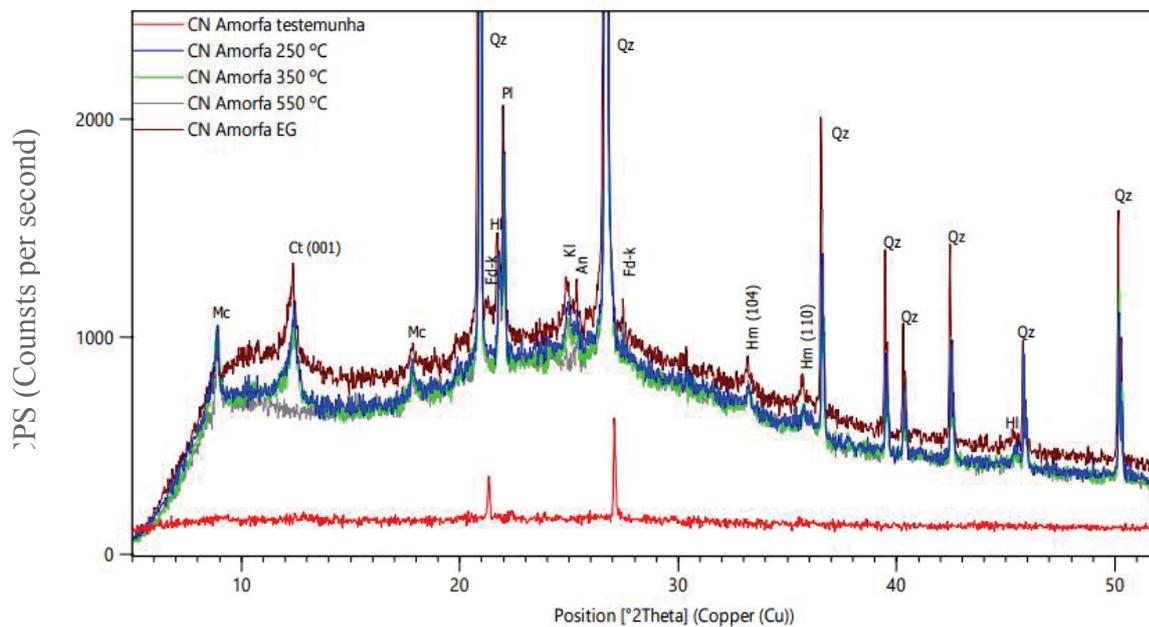
L40: Lavoura de 40 anos; Testemunha: solo em condição natural de campo, sem extração química de Si realizada em laboratório; CN amorfa: solo com extração química de sílica amorfa realizada em laboratório. CN ocluso: solo com extração química realizado em laboratório de Si presente nos sesquióxidos de Fe e Al; testemunha: lâminas sem tratamentos. Mc: mica; Ct: caulinita; Pl: plagioclásio; Hm: hematita; Hl: halita; Qz: Quartzo.

Figura 10: Análise de DRX em solos de campo nativo com tratamento nas lâminas. Passo Fundo – RS, 2022.



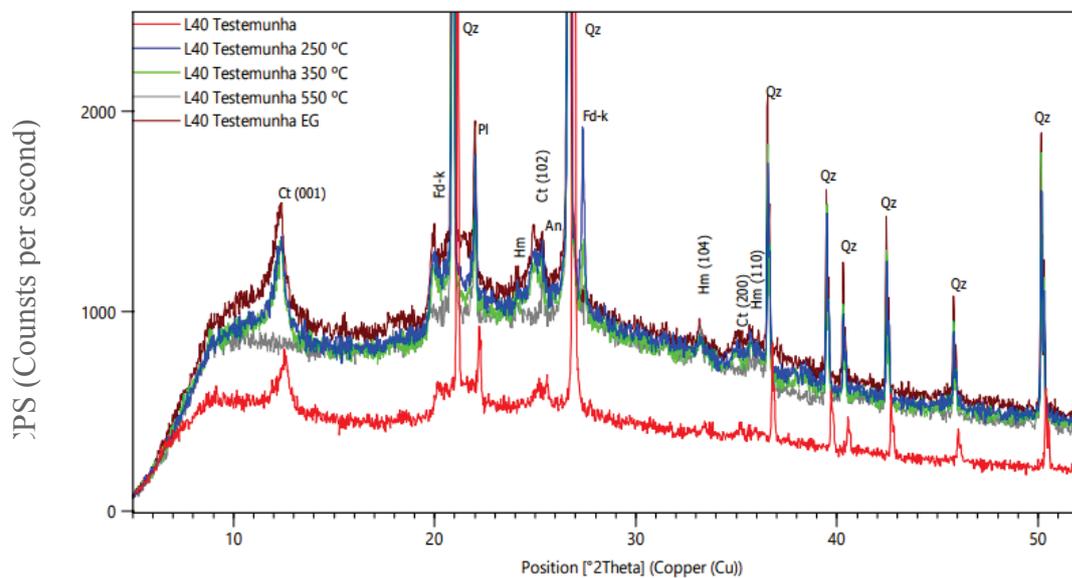
CN: Campo nativo; Testemunha: solo em condição natural de campo, sem extração química de Si realizada em laboratório; 250 °C, 350 °C e 550 °C: tratamentos térmicos realizado nas lâminas; EG: tratamento com etileno glicol realizado nas lâminas. Mc: mica; Ct: caulinita; Pl: plagioclásio; Hm: hematita; Hl: halita; Qz: Quartzo; Fd-k (Feldspato potássico); An: anatásio.

Figura 11: Análise de DRX em solo de campo nativo com extração química de sílica amorfa e tratamento de lâminas. Passo Fundo – RS, 2022.



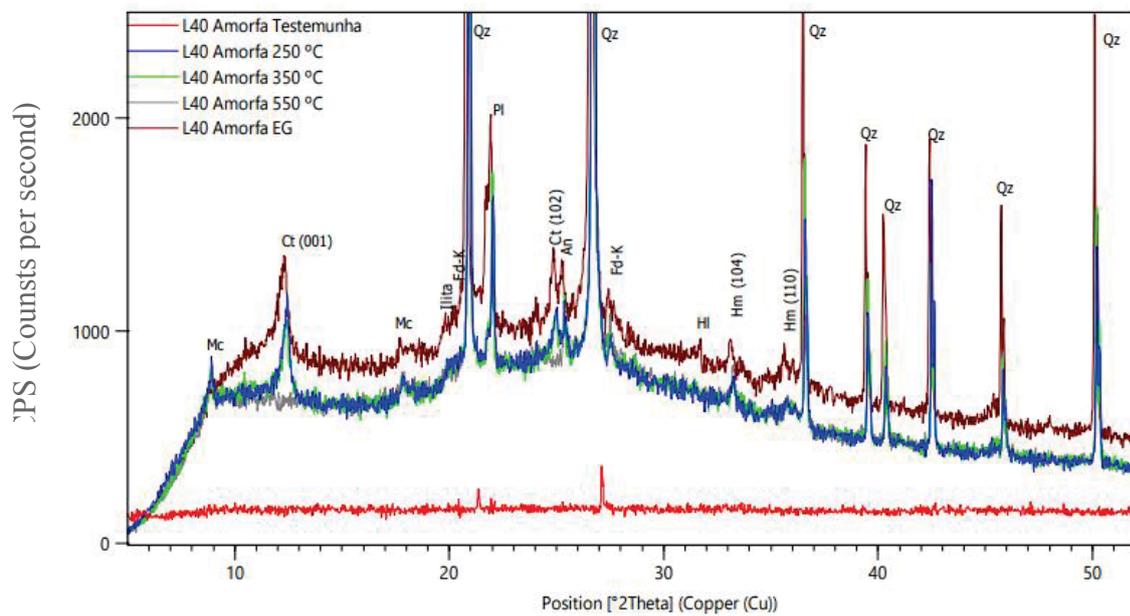
CN: Campo nativo; CN amorfa: solo com extração química de sílica amorfa realizada em laboratório; testemunha: lâminas sem tratamentos; 250 °C, 350 °C e 550 °C: tratamentos térmicos realizado nas lâminas; EG: tratamento com etileno glicol realizado nas lâminas. Mc: mica; Ct: caulinita; Pl: plagioclásio; Hm: hematita; Hl: halita; Qz: Quartzo; Fd-k (Feldspato potássico); An: anatásio; Kl: caulim

Figura 12: Análise de DRX em solo de lavoura de 40 anos com tratamento de lâminas. Passo Fundo – RS, 2022.



L40: Lavoura de 40 anos; Testemunha: solo em condição natural de campo, sem extração química de Si realizada em laboratório; 250 °C, 350 °C e 550 °C: tratamentos térmicos realizado nas lâminas; EG: tratamento com etileno glicol realizado nas lâminas. Mc: mica; Ct: caulinita; Pl: plagioclásio; Hm: hematita; Hl: halita; Qz: Quartzo; Fd-k (Feldspato potássico); An: anatásio.

Figura 13: Análise de DRX em solo de campo nativo com extração química de sílica amorfa e tratamento de lâminas. Passo Fundo – RS, 2022.



L40: Lavoura de 40 anos; CN amorfa: solo com extração química de sílica amorfa realizada em laboratório; testemunha: lâminas sem tratamentos; 250 °C, 350 °C e 550 °C: tratamentos térmicos realizado nas lâminas; EG: tratamento com etileno glicol realizado nas lâminas. Mc: mica; Ct: caulinita; Pl: plagioclásio; Hm: hematia; Hl: halita; Qz: Quartzo; Fd-k (Feldspato potássico); An: anatásio; Kl: caulim

5 DISCUSSÃO

5.1 Relação entre as frações de Si nos solos

O ácido monossilício (solúvel) e o ácido polissilícico (insolúvel) - que compõem a fase líquida do Si, ou seja, a fração móvel - interferem no sistema do solo, portanto, a quantificação do teor de Si disponível é importante para entender o balanço do elemento para uma determinada região (MAJUMDAR; NAGABOVANALLI, 2021). É através do entendimento sobre a biodisponibilidade do Si em ecossistemas agrícolas intensivamente cultivados que conseguimos conhecer a dinâmica do elemento no solo. Sabendo que uma porcentagem pequena de Si compõe a solução do solo, entendemos que se torna necessário a dissolução do elemento para repor a quantidade exportada pelas plantas e manter o teor de Si necessário disponível para a vegetação sucessiva.

A extração sequencial de Si dos tratamentos avaliados nos permitiu entender a interação e relação entre as formas de Si que temos presente nos solos. O menor teor de matéria orgânica observado na lavoura de 40 anos quando comparado aos demais tratamentos, indica que com o uso do solo para a produção agrícola ocorre a decomposição da matéria orgânica que ali estava presente e não há reposição dela para o solo. Juntamente com isso, ocorre a solubilidade de Si para o solo, que passa a fazer parte da fase líquida, justificando o aumento de Si_l na lavoura de 40 anos comparada ao campo nativo. Geralmente, as partes aéreas das plantas acumulam mais Si do que as raízes (HODSON et al., 2005) conseqüentemente teremos com a decomposição da palha, reposição desse Si para o solo. Contudo, através da colheita, o Si é exportado através da parte colhida, sendo retirado do solo (NAGABOVANALLI; MAJUMDAR; KOLLALU, 2022).

Além disso, a diminuição do teor da fração de sílica amorfa (Si_{ta}) observado entre campo nativo e as lavouras de 8 e 40 anos também corroboram para o aumento do Si_l das

lavouras. Pois a dissolução do elemento da fração Si_{ta} passa a compor a fração Si_l também, ficando disponível para a absorção das plantas. A solubilidade do Si da fase sólida afeta significativamente a concentração de Si na fase líquida, sendo maior a contribuição esperada da sílica amorfa do que o quartzo, um material de silicato cristalino (TUBANA; BABU; LAWRENCE & DATNOFF, 2016).

As fases de Si que compõem um determinado solo desempenham papel importante na dinâmica do teor do elemento que estará disponível no solo para as plantas. Essencialmente, a suficiência ou deficiência de Si no solo é determinada pela taxa de reposição do elemento na solução do solo e a taxa de absorção de Si durante o crescimento da planta (MARSCHNER, 1995).

5.2 Influência do uso do solo nas frações de Si

As frações de Si: Si_l , Si_{org} e Si_{ta} apresentaram-se sensíveis ao uso do solo. A produção agrícola alterou a dinâmica do Si no solo através da diminuição do Si_{org} e Si_{ta} nas lavouras. Conseqüentemente, aumentou o teor de Si_l que compõem os solos de lavoura.

O campo nativo possui 48% mais Si_{org} do que os demais tratamentos avaliados, isso ocorre, pois, este solo apresenta maior teor de matéria orgânica do que solos usados para lavoura a 40 anos. O maior teor de matéria orgânica faz com que haja maior Si presente no solo associado a ela, além de que quando há maior quantidade dela, ocorre uma indução de maior mobilidade do elemento devido à redução de óxidos hidratados de Fe, liberando ácido monossilícico adsorvido (KABATA-PENDIAS; BARBARA, 2015). Assim, uma maior decomposição da matéria orgânica associada ao uso do solo proporcionará maior liberação de Si móvel. Situação essa observada no uso do solo em lavoura após 2 anos de cultivo.

Áreas de cultivo que possuem menor quantidade de sílica biogênica, apresentam maiores concentrações de Si dissolvido (móvel), enquanto pastagens e florestas, onde predominam reservatórios pedogênicos apenas em profundidade abaixo de 40 cm, têm

liberação inicial de Si mais limitada (BARÃO et al., 2020). Isso ocorre pois os reservatórios de Si mineral possuem liberação de Si imediata enquanto o Si biogênico apresenta uma dissolução inicial mais lenta (BARÃO et al., 2020).

Em relação a Si_{ta} , sabemos que o uso do solo para produção agrícola interfere no reservatório dessa fração, diminuindo a quantidade de Si encontrada nessa forma com o tempo, até se esgotar, o que é contrário aos ecossistemas naturais (NAGABOVANALLI; MAJUMDAR; KOLLALU, 2022). A magnitude da reciclagem de diferentes resíduos de culturas também influencia o teor de Si amorfo do solo (MAJUMDAR; PRAKASH, 2020b).

O Si total dos solos apresentou maior valor para a lavoura de 40 anos. A adubação e calagem realizada em solos cultivados são uma forma de influenciar nos teores de Si dos solos, pois atualmente, calcários possuem em média 15% de SiO_2 (BORTOLUZZI et al., dados não publicados). Levando em consideração o histórico do produtor, o maior teor de Si total pode estar relacionado ao uso de calcário que disponibiliza Si para o solo. Conforme o histórico do proprietário da área, é colocado nas áreas de lavoura 2 toneladas de calcário a cada 5 anos, assim, cada uma das vezes que é adicionado calcário, são colocados 300 kg de SiO_2 no solo, sendo 94,80 kg de Si. Contudo, vale ressaltar que para as plantas absorverem o elemento, ele precisa estar na forma de ácido monossilícico.

Vale lembrar que nesse trabalho não está computado as perdas de Si por lixiviação e erosão.

5.3 Perspectivas no uso e manejo do solo baseado no Si

O uso da terra altera a quantidade de reservatórios Si biogênico e mineral ao longo do perfil do solo (BARÃO et al., 2020). Com o intemperismo intenso, os solos passam a se tornar deficientes em Si devido ao declínio da proporção de sílica para sesquióxidos (FOY, 1992; JUO; SANCHEZ, 1986). Portanto a dessilicação como resultado do processo de intemperismo natural e a absorção de Si pelas plantas, podem ser considerados como um fator importante para a baixa produtividade, principalmente de

plantas acumuladoras de Si (NAGABOVANALLI; MAJUMDAR; KOLLALU, 2022). Além disso, a solução do solo é um sistema aberto em que a lixiviação e a difusão afetam os produtos de dissolução produzidos durante o processo de intemperismo de minerais silicáticos (HARLEY; GILKES, 2000).

Outros fatores que interferem na dinâmica do elemento no solo são por exemplo, o clima, pois, em solos de áreas tropicais úmidas o processo de dessilicação ocorre de forma mais acelerada do que em ambientes temperado (KARATHANASIS, 2006). É de conhecimento que o Si, apesar de não classificado como essencial para as plantas, é de importância para o crescimento e desenvolvimento de muitas culturas, principalmente aquelas consideradas acumuladoras dele (MEYER; KEEPING, 2001; SAVANT; SNYDER; DATNOFF, 1997). Assim, manter um nível suficiente de N, P e K e não considerar outros nutrientes e elementos benéficos como o Si pode resultar em desequilíbrio na nutrição das plantas, pela possibilidade de falta do elemento disponível no solo, causado pelo uso dele, com extração via palha e grão e sem reposição do elemento para a sequência da produção agrícola. Essa quantidade não é repostada via adubação. Assim, ao extrapolar o potencial de exportação de Si, tem-se que a produção agrícola da soja em uma área de 29.841 milhões de hectares gera uma produção de 84.690 milhões de toneladas de grãos (RENARD et al., 1997), sendo que a massa seca disso representa 127.040 milhões de toneladas. Essa produção estima um conteúdo de Si na parte aérea da planta de 13,9 g kg⁻¹ (HODSON et al, 2005), com exportação de 59 kg ha⁻¹ do elemento em uma média de 10 anos de produção (TUBANA; LAWRENCE & DATNOFF; BABU et al., 2017).

Neste trabalho, ao avaliar o impacto causado pelo sistema agrícola com produção anual de soja, notamos alteração na dinâmica do elemento. A extração de Si via grão de soja na colheita já apresentou interferência nos reservatórios do elemento no solo, apesar do maior teor de Si_i ter sido encontrado na lavoura de 40 anos, houve diminuição do teor de Si_{org}, de Si_{ta} e da Si_{ft} para as lavouras.

Quanto mais anos de uso do solo para produção agrícola anual maior será a alteração no sistema do solo, por consequência, maiores alterações na dinâmica do

elemento, podendo levar a insuficiência do teor de Si disponível para as plantas e acabando com o estoque de Si dos solos. Tendo isso em vista, pode-se afirmar fortemente que os resíduos das culturas são as fontes diretas de Si biogênico, e por isso é recomendado que materiais ricos em Si sejam considerados como uma alternativa de fonte do elemento para o solo (NAGABOVANALLI; MAJUMDAR; KOLLALU, 2022).

Existe uma diminuição da produtividade de solos cultivados com arroz, sem reposição de Si (SAVANT; SNYDER; DATNOFF, 1997). Para a cultura da soja a diminuição do teor disponível para a planta absorver já ocasionou sintomas como a má formação de folhas e a redução da fertilidade do grão-de-pólen (MIYAKE; TAKAHASHI, 1985).

Estudos preliminares relacionados ao arroz na Louisiana mostraram que distúrbio fisiológico notado no arroz coincidem com baixos níveis de Si, havendo possibilidade de a deficiência do elemento ter causado as alterações nas plantas (BREITENBECK; SAICHUK; KRASHA, 2006). Isso significa que a dissolução do Si nem sempre ocorrerá de forma que supra as necessidades da planta, mas sim conforme a consequência do uso do solo e alterações granulométricas e a existência das condições favoráveis para que o elemento possa se dissolver para a forma de ácido monossilícico, pois são características como pH e tamanho de partícula que interferem nessa solubilidade (SOMMER et al., 2006).

Quando os solos utilizados nas regiões agrícolas possuem quantidades apreciáveis de minerais 2:1, normalmente, a fertilização de Si tem sido negligenciada, pois, se sugere que nessa organização de argilominerais há quantidades adequadas de silicatos disponíveis para as culturas (KRASKA; BREITENBECK, 2010). Além disso, quando se trata de extração de Si por plantas não acumuladoras como a soja, também não há expressiva quantidade de estudos. Mas, com os resultados obtidos e o contexto avaliado, notamos a necessidade da adubação visando reposição de Si no solo, visto que está havendo dessilicação do solo através do manejo agrícola, mesmo quando se trata de uma planta não acumuladora.

Vale ressaltar a recomendação para deixar a palha no solo após encerrar o ciclo da cultura, pois a palha é a parte mais rica em Si que compõe a planta e sua decomposição proporcionaria a dissolução do elemento para o solo (GÜNTZER et al., 2012), contribuindo também para a maior quantidade de matéria orgânica que reduz os óxidos liberando o Si que está ligado a eles (KABATA-PENDIAS; BARBARA, 2015), recuperando solos contaminados por metais e melhorando o sequestro de carbono (NAGABOVANALLI; MAJUMDAR; KOLLALU, 2022).

Caso práticas como essa não sejam adotadas podemos nos deparar futuramente com quantidade inadequada de Si para absorção das plantas e alteração na intensidade dos minerais silicáticos do solo, havendo reorganização das estruturas, acelerando o intemperismo. Essas alterações acarretarão consequências para toda cadeia produtiva agrícola, desde qualidade do solo até o impacto na produção.

5.4 Mineralogia do solo após aplicação da extração sequencial de Si

A análise das possíveis modificações da mineralogia entre campo nativo e lavoura não foi conclusiva. A assembleia de minerais não foi alterada. Contudo, a proporção dos minerais foi sensível aos usos do solo a julgar pela diferença na proporção de tamanho de partículas. Já a mineralogia após os tratamentos de extração de Si demonstrou que a extração de Si ocluso alterou a assembleia de minerais.

O resultado do DRX nos possibilitou identificar os minerais silicáticos, ou seja, aqueles que são compostos por tetraedros de Si, sendo o mineral identificado com maior quantidade e intensidade o quartzo. O quartzo é um mineral silicático classificado como um tectossilicato juntamente com o feldspato e é um mineral de difícil intemperização, permanecendo nas frações areia e silte dos solos e tendo variação no seu teor conforme o material de origem (MEURER, 2006). Já o feldspato é um mineral com intemperização mais fácil quando comparado ao quartzo e libera Na, K e Ca para o solo ao se intemperizar.

A presença de picos de quartzo identificados acontece devido ao seu arranjo compacto possuir alta resistência ao intemperismo, sendo o mineral mais abundante nos solos e nas frações areia e silte (ALLEN; HAJEK, 1989; DREES et al., 1989; INDA JR. et al., 2006).

Partículas de menor tamanho encontradas através da análise de difração laser e granulométrica entre os tratamentos de campo nativo e lavoura de 40 anos indica a liberação de Si presente na fase sólida na forma cristalina, como os silicatos primários (feldspato, mica) e materiais silicáticos (quartzo). O Si dissolvido através da solubilização dos minerais irá compor a solução do solo e a fração móvel sendo facilmente absorvida pela cultura, mas também lixiviada. Havendo essa liberação de Si das partículas de areia e silte, temos Si liberado para a fase líquida do solo.

A diminuição da intensidade dos picos de caulinita observado indica pequenas alterações que podem levar à sua transformação em óxidos de solo (DALACORTE, 2022). A caulinita é um dos minerais de argila frequentemente encontrada em solos tropicais e subtropicais e normalmente é considerada o mais estável dos filossilicatos (ALLEN; HAJEK, 1989; DIXON, 1989; LUCHESE et al., 2001; MEURER, 2000). Origina-se de minerais como o feldspato e micas, ou secundários pela degradação de argilas 2:1, sendo sua ocorrência bastante expressiva na fração argila de solos tropicais como os Latossolos (KÄMPF; CURI, 2003; KER, 1997).

Existe a estimativa de que com o passar dos anos aumente o teor de argila do solo, fazendo com que os minerais silicáticos como o feldspato e micas dissolvam elementos estruturais e aumente a presença de minerais como a caulinita (DALACORTE, 2022).

A análise de DRX após a extração de Si ocluso em sesquióxidos de Fe e Al e a sílica amorfa nos possibilita simular o processo de dissolução das formas de Si que compõem o solo. A partir dessas análises, se pode observar que ao extrair Si dessas frações ocorre a diminuição da intensidade dos picos de ocorrência dos minerais presente nos tratamentos, assim como a identificação de minerais que não faziam parte da

composição do solo anteriormente, caracterizando uma reestruturação. Assim, estimamos o comportamento dos minerais do solo em caso de dissolução total dessas formas de Si.

6 CONCLUSÕES

Com o trabalho corrobora-se a hipótese: em que a produção agrícola e a extração de Si realizada pela cultura da soja, no decorrer dos cultivos, interferiu na quantidade do elemento em suas diferentes formas químicas presentes no solo.

O fracionamento de Silício indicou que a proporção das formas químicas de Si é, em ordem decrescente: a sílica amorfa > Si ligado à matéria orgânica do solo > Si adsorvido no complexo de troca > o Si ocluído nos óxidos do solo > o Si móvel.

O uso do solo a partir do campo nativo resulta na diminuição do teor de matéria orgânica do solo, fazendo com que o Si associado a ela passe a compor a fração móvel, aumentando o teor de Si presente na solução do solo ao longo dos anos de cultivo.

O teor de sílica amorfa do solo diminui conforme os anos de uso do solo para o cultivo agrícola.

Dessa forma, o uso agrícola do solo para cultivo agrícola altera o ciclo biogeoquímico do Si através da diminuição do teor de matéria orgânica do solo e por consequência diminuição do teor de Si associado a ela, assim como diminuí o teor de sílica amorfa. Isso indica a aceleração do processo de dessilicação. Ainda, nossos resultados indicam haver a necessidade de manejo da fertilidade do solo que considerem o elemento Si e sua ciclagem, para que as plantas extraíam e exportem o Si proveniente dos fertilizantes e não esgotem o teor do elemento no solo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ações antrópicas interferem diariamente no meio ambiente. Entretanto, cada uma delas têm suas especificidades devido a diversidade e capacidade de adaptação que encontramos em nosso planeta. É em razão desses fatores que o ciclo do Si vem sendo estudado em diferentes situações.

A extração do Si e diminuição do teor do elemento no solo já era comprovada, entretanto, o presente trabalho proporcionou conhecer a intensidade da diminuição do elemento em um Latossolo Bruno Alumínico típico localizado em uma região de clima subtropical, classificado como mesotérmico úmido e manejado com cultivo de uma planta considerada não acumuladora de Si, a Soja. Com os resultados obtidos podemos avançar com o entendimento do ciclo do elemento e com recomendações técnicas de fertilidade do solo mais assertivas quanto ao elemento silício.

REFERÊNCIAS

- ADATIA, M. H.; BESFORD, R. T. The effects of silicon on cucumber plant grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, v. 58, p. 343-351, 1986.
- ALBERT, R. M.; BAMFORD, M. K.; CABANES, D. Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples. **Quat. Int.**, n. 148, p. 78-94, 2006.
- ALEXANDRE, A.; BOUVET, M.; ABBADIE, L. The role of savannas in the terrestrial Si cycle: A case-study from Lamto, Ivory Coast. **Global and Planetary Change**, v. 78, p. 162–169, 2011.
- ALEXANDRE, A.; MEUNIER, J. D.; COLIN, F.; KOUD, J. M. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 61, p. 677-682, 1997.
- ALLEN, B. I.; HAJEK, B. F. Mineral Occurrence in Soil Environments. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 199-278.
- ANDRADE, G. R. P.; AZEVEDO, A. C.; CUADROS, J.; FURQUIM, S. A. C.; SOUZA JUNIOR, V.S.; KIYOHARA, P. K.; VIDAL-TORRADO, P. Transformation of kaolinite into smectite and Fe-illite in Brazilian mangrove soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 78, p. 655–672, 2014.
- BABU, T.; LAWRENCE & DATNOFF.; TUBANA, B.; WHITE, B. Survey of the Plant-Available Silicon Status of Agricultural Soils in Louisiana. **Journal of Plant Nutrition**. v. p. 2017.
- BAKKER, E.; LANSON, B.; FINDLING, N.; WANDER, M. M.; HUBERT, F. Mineralogical differences in a temperate cultivated soil arising from different agronomic processes and plant K-uptake. *Geoderma*, v. 347, p. 210-219, 2019.
- BARÃO, L.; TEIXEIRA, R. FM.; VANDEVENNE, A.; RONCHI, B. J.; BELMONTE-UNZUÉ, D.; STRUYF, E. Silicon mobilization in Soils: the Broader Impact of Land Use? **Springer**. v. 12, p. 1529-1538, 2020.
- BARBONI, D.; BONNEFILLE, R.; ALEXANDRE, A.; MEUNIER, J. D. Phytoliths as Paleoenvironmental Indicators, West Side Middle Awash Valley, Ethiopia. **Palaeogeography, Paleoclimatology, Paleoecology**, v. 152, p. 87-100, 199.

- BARTOLI, F. Crystallochemistry and surface properties of biogenic opal. **Soil Science**. v. 36, p. 335-350, 1985.
- BARTOLI, F.; WILDING, L. P. Dissolution of biogenic opal as a function of its physical and chemical properties. **Soil Science Society of America**. v. 44, p. 873–878, 1980.
- BASILE-DOELSCH, I.; MEUNIER, J. D.; PARRON, C. Another continental pool in the terrestrial silicon cycle. **Nature**, v. 433, p. 399–402, 2005.
- BAYER, C.; LOVATO, T.; DIEKOW, J.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. A. method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil & Tillage Research**, v. 91, p. 217-236, 2006.
- BEERLING, D. J.; KANTZAS, E. P.; LOMAS, M. R.; WADE, P.; EUFRASIO, R.M.; RENFORTH, P.; BANWART, S. A. Potencial for large-scale CO₂ removal from rock weathering with agricultural land. **Nature**. v. 583. n. 7815. p. 242-248, 2020.
- BERTHELSEN, S.; NOBLE, A. D.; GARSIDE, A. L. Silicon research down under: past, present, and future. In: Studies in Plant Science. **Elsevier**, v. 4814 p. 241-255, 2001.
- BERTOLAZI, V. T. **Alteração mineralógica em solos do sul do brasil: Evolução pedogênica e impacto antrópico**. 2017. 159 f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade de Poitiers - Porto Alegre.
- BLECKER, S. W.; MCCULLEY, R. L.; CHADWICK, O. A.; KELLY, E. F. Biologic cycling of silica across a grassland bioclimesequence. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 20, 2006.
- BORTOLUZZI, E. C.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER, D. S.; CASALI, C. A.; MELO, G. W.; BRUNETTO, G. Mineralogical changes caused by grape production in a regosol from subtropical Brazilian climate. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, p. 854–862, 2012.
- BORTOLUZZI, E. C.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER, D. S.; CASALI, C. A.; MELO, G. W.; BRUNETTO, G. Mineralogical changes caused by grape production in a regosol from subtropical Brazilian climate. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, p. 854–862, 2012.
- BORTOLUZZI, E. C.; POLETO, C. **Metodologias para estudo de sedimentos: ênfase na proporção e na natureza mineralógica das partículas**. In: Qualidade dos sedimentos. 2^a ed. p. 81 – 120, 2013.

- BORTOLUZZI, E. C.; RHEINHEIMER, D. S.; GATTIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; TESSIER, D. Alterações na mineralogia de um Argissolo do Rio Grande do Sul afetado pela fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 327–335, 2005.
- BORTOLUZZI, E. C.; SANTOS, D. R. dos.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C.; TESSIER, D. Alterações na mineralogia de um Argissolo do Rio Grande do Sul submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 327-335, 2005.
- BREITENBECK, G.; SAICHUK, J.; KRASHA, J. Unraveling mystery malady in south Louisiana rice. **Louisiana Agriculture**. v. 49, n. 3, p. 11, 2006.
- CAREY, J. C.; FULWEILER, R. W. The terrestrial Silica Pump. **PLoS ONE**, v. 7, e52932, 2012.
- CAREY, J. C.; FULWEILER, R.W. Human appropriation of biogenic silicon – the increasing role of agriculture. **Functional Ecology**, v. 30. p. 1331-1339, 2016.
- CHADWICK, O. A.; CHOROVER, J. The chemistry of pedogenic thresholds. **Geoderma**, v. 100, p. 321–353, 2001.
- CHEN, PEI-YUAN. Table of Key Lines in X-ray Powder Diffraction Patterns of Minerals in Clays and Associated Rocks. Departament of natural resources geológicas survey occasional papper 21. Authority of the State of Indiana. Bloomington, Indiana, 1977.
- CHURCHMAN, G. J.; LOWE, D. J. **Handbook of Soil Sciences: Alteration, formation, and occurrence of minerals in soils**. Florida: CRC press, 2012.
- CONLEY, D. J.; CAREY, J. C. Silica cycling over geologic time. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 431-432, 2015.
- CONLEY, D. J. Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle. **Global Biogeochem**. v. 16, p. 1121.
- CLYMANS, W.; STRUYF, E.; GOVERS, G.; VANDEVENNE, F.; CONLEY, D. J.; Anthropogenic impact on amorphous silica pools in temperate soils. **Biogeosciences**. v. 8, n. 8, p. 2281-2293, 2011.
- COLZATO, M. **Preparo de amostras para análise elementar aplicado a estudos agroambientais**. In: Central Multiusuário de Análises Ambientais – USP, 2020.

- CORNELIS, J. T.; RANGER, J.; ISERENTANT, A.; DELVAUX, B. Tree species impact the terrestrial cycle of silicon through various uptakes. **Biogeochemistry**, v. 97, n. 2, p. 231-245, 2010.
- CORNELIS, J. T.; DELVAUX, B. Soil processes drive the biological silicon feedback loop. **Funct. Ecol.**, v. 30, p. 1298-1310, 2016.
- CORNELIS, J. T.; DELVAUX, B.; GEORG, R.B.; LUCAS, Y.; RANGER, J.; OPFERGELT, S. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil–plant systems towards rivers: a review. **Biogeosciences**, v. 8, p.8 9–112, 2011a.
- CORNELIS, J. T.; DUMON, M.; TOLOSSA, A. R.; DELVAUX, B.; DECKERS, J.; VAN RANST, E. The effect of pedological conditions on the sources and sinks of silicon in the Vertic Planosols in south-western Ethiopia. **Catena**, v. 112, p. 131-138, 2014a.
- CORNELIS, J. T.; TITEUX, H.; RANGER, J.; DELVAUX, B. Identification and distribution of the readily soluble silicon pool in a temperate forest soil below three distinct tree species. **Plant and Soil**, v. 342, p. 369-378, 2011b.
- CORNELIS, J. T.; WEIS D.; LAVKULICH L.; VERMEIRE ML.; DELVAUX B.; BURLING, J. Silicon isotopes record dissolution and re-precipitation of pedogenic clay minerals in a podzolic chronosequence. **Geoderma**, v. 235–236, p. 19–29, 2014.
- COSTA, L. M. da. Ocorrência de corpos silicosos em horizontes superficiais de solos de diferentes ecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 871-879, 2010.
- DALACORTE, L. **Mineralogia do solo relacionada ao silício no sistema solo-planta**. [121]. f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2021.
- DANILOVA, A.; SAUER, D.; BREUNER, J.; HERMANN, L.; ZAREI, M.; STAHR, K. Development of a method for sequential extraction of Si-pools from soils. **World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World**. Australian, 2010.
- DAYANANDAM, P.; KAUFMAN, P. B.; FRAKIN, C. I. Detection of silica in plants. **American Journal of Botany**, v. 70, n. 10, p. 1079 – 1084, 1983.

- DEREN, C. W.; DATNOFF, L. E.; ZINDER, G. H.; MARTÍN, F. Silicon concentration disease response and yield components of rice genotypes grown on flooded organic Histosols. **Crop Science**, v. 34, p. 733-737, 1994.
- DERRY, L. A.; KURTZ, A. C.; ZIEGLER, K.; CHADWICK, O. A. Biological control of terrestrial silica cycling and export fluxes to watersheds. **Nature**, v. 433, p. 728–731, 2005.
- DIETZEL, M. Interaction of polysilicic and monosilicic acid with mineral surfaces. In: Water-rock interaction. **Springer**. p. 207-235, 2002.
- DIXON, J. B. Kaolin and Serpentine Group Minerals. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 467-526.
- DREES, L. R.; WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; SENKAYI, A. L. Silica in Soils: Quartz and Disordered Silica Polymorphs. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 913-974.
- DOVE, P. M. Kinetic and thermodynamic controls on silica reactivity in weathering environments, in White, A. F., Brantley, S. L. (eds.): Chemical weathering rates of silicate minerals. **Mineralogical Society of America**, v. 31 p. 235–290, 1995.
- ELAWAD, S. H.; GREEN JUNIOR, V. E. Silicon and the rice plant environment: a review of recent research. **Riso**, v. 28, p. 235-253, 1979.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, p. 529-538, 1995.
- EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Biology**, v. 50, p. 641–664, 1999.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proc. Natl. Acad. Sci.**, v. 91, p. 11–17, 1994.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas. Londrina, **Planta**, p. 403, 2006.
- ERNST, W. H. O.; VIS, R. D.; PICCOLI, F. Silicon in developing nuts of the sedge *Schoenus nigricans*. **J. Plant Physiology**, v. 146, p. 481-488, 1995.

- FABRI, F. P.; AULER, A.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Relevo cárstico em rochas siliciclásticas: uma revisão com base na literatura. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 3, 2014.
- FASSBENDER, H. W. **Química de Suelos, con Énfasis en Suelos de América Latina**. Costa rica: Ed. IICA, 1978.
- FETH, J. H.; ROGERS, S. M.; ROBERSON, C. E. Aqua de Ney – California: a spring of unique chemical character. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 22, n. 2, p. 75-77, 1961.
- FOY, C. D. Soil chemical factors limiting plant root growth. **Advances in Soil Science**. v. 19, p. 97-149, 1992.
- GALÁN, C. Disolución y gènesis del karst en rocas carbonáticas y rocas silíceas: un estudio comparado. **Munibe**, v. 43, p. 43-72, 1991.
- GALLOWAY, J. N.; ABER, J. D.; ERISMAN, J. W.; SEITZINGER, S. P.; HOWARTH, R. W.; COWLING, E. B.; COSBY, B. J. The nitrogen cascade. **Bioscience**. v. 53, n. 4, p. 341-356, 2003.
- GEE, G. W., BAUDER, J. W. Methods of soil analysis. In: KLUTE, A. **Particle-size analysis**. 1 ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 383-411.
- GEORGIADIS, A.; SAUER, D.; HERRMANN, L.; BREUER, J.; ZAREI, M.; STAHR, K. Development of a method for sequential Si extraction from soils. **Geoderma**, v. 209, p. 251-261, 2013.
- GEORGIADIS, A. **Entwicklung einer Methode zur fraktionierten Si-Bestimmung in böden des Feucht-gemäßigten Klimas**. [310]. Dissertation – Universität Hohenheim, Stuttgart, 2011.
- GÉRARD, F.; MAYER, K. U.; HODSON, M. J.; RANGER, J. Modelling the biogeochemical cycle of silicon in soils: application to a temperate forest ecosystem. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.72, n.3, p. 741–758, 2008.
- GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J.-D. Benefits of plant silicon forcrops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. v. 32, p. 201-213, 2012.
- GUNTZER, F., KELLER, C.; POULTON, P. R.; MCGRATH, S. P.; MEUNIER, J.-D.; Long-term removal of wheat straw decreases soil amorphous silicat Broadbalk, Rothamsted. *Plant and Soil*. v. 352, p. 173–184, 2012

- HARLEY, A. D.; GILKES, R. J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: A geochemical overview. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** v. 56, n. 1, p. 11-36, 2000.
- HARRISON, C. C. Evidence for intramineral macromolecules containing protein from plant silicas. **Phytochemistry.** v. 41, n. 1, p. 37-42, 1996.
- HAYNES, R. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, v. 177, p. 831-844, 2014.
- HAYSOM, M. B. C.; CHAPMAN, L. S. Some aspects of the calcium silicate trials at Mackay. **In: Proceedings.** 1975.
- HENRIET, C.; DE JAEGER, N.; DOREL, M.; OPFERGELT, S.; DELVAUX, B. The reserve of weatherable primary silicates impacts the accumulation of biogenic silicon in volcanic ash soils. **Biogeochemistry**, v. 90, p. 209–223, 2008.
- HODSON, M. J., WHITE, P. J., MEAD, A., BROADLEY, M. J. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. **Ann. Bot.**, v. 96, p. 1027–1046, 2005.
- ILER, R. K. The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica. Nova Jersey: **Wiley Interscience**, 1979.
- INDA JR., A. V.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C do. Composição da Fase Sólida Mineral do Solo In: MEURER, E. J. (Ed.). Fundamentos de Química do Solo. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p. 31-61.
- JANZEN, H. H.; FIXEN, P. E.; FRANZLUEBBERS, A. J.; HATTEY, J.; IZAURRALDE, R. C.; KETTERINGS, Q. M.; LOBB, D. A.; SCHLESINGER, W. H. Global prospects rooted in soil science. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, p. 1–8, 2011.
- JARVIS, S. C. The uptake and transport of silicon by perennial ryegrass and wheat. **Plant Soil**, v. 97, p. 429-438, 1987.
- JENKINS, E. Phytolith taphonomy: a comparison of dry ashing and acid extraction on the breakdown of conjoined phytoliths formed in *Triticum durum*. **J. Archaeol. Sci.**, v. 36, n. 2402-2407, 2009.
- JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils plants and animals. **Adv. Agron.**, v. 19, p. 107-149, 1967.

- JUO, A. S. R.; SANCHEZ, P. A. Soil nutritional aspects with a view to characterize upland rice environment. **In Upland Rice Research**. p. 81-94, 1986.
- PEREIRA, J. P. Efeito de doses de silício sobre a produtividade e características agrônômicas da soja [Glycine max (L.) Merrill]. **Ciência e agrotecnologia**, v. 34, n. 4, p. 908-913, 2010.
- KABATA-PENDIAS, A.; BARBARA, S.; Trace elements in soils and plants. **Boca Raton**. FL, CRC Press London, 2015.
- KÄMPF, N.; CURTI, N. Argilominerais em solos brasileiros. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 3, p. 1-54, 2003.
- KARATHANASIS, A. D. Clay minerals: weathering and alteration. In Encyclopedia of Soil Science. v. 2. ed. R. Lal, 281–6. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
- KELLER, C.; RIZWAN, M.; MEUNIER, J-D.; Are clay minerals a significant source of Si for crops? A comparison of amorphous silica and the roles of the mineral type and pH. **Silicon**. v. 13, n. 10, p. 3611-3618, 2021.
- KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma Revisão. **Geonomos**, v. 51, p. 17-40, 1997.
- KER, J. C.; CURTI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL. P. **Pedologia: fundamentos**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2012
- KHORMALI, F.; GHERGHERECHI, S.; KEHL, M.; AYOUBI, S. Soil formation in loess-derived soils along a subhumid to humid climate gradient, Northeastern Iran. **Geoderma**, v. 180, p. 113-122, 2012.
- KÖHLER, P.; HARTMANN, J.; WOLF-GLADROW, D. A. Geoengineering potential of artificially enhanced silicate weathering of olivine. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. v. 107, n. 47, p. 20228-20233, 2010.
- KORCHAGIN, J.; BORTOLUZZI, E. C.; MOTERLE, D. F.; PETRY, C.; CANER, L. Evidences of soil geochemistry and mineralogy changes caused by eucalyptus rhizosphere. **Catena**, v. 175, p. 132-143, 2019.
- KORNDÖRFER, G.H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 101-106, 1999.

- KORNDÖRFER, G. H.; LEPSCH, I. Effect of silicon on plant growth and yield. In: DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H. (Eds.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 133-147.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício**: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004. (Boletim Técnico, 2).
- KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H.; UCHOA, G.; DATNOFF, L. E. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, p. 1071-1084, 2001.
- KRAUSKOPF, K. B. **Introdução à Geoquímica**. São Paulo: Polígono/Edusp, vol. 1. 1972.
- KRASKA, J. E.; BREITENCECK, G. A.; Survey the silicon status of flooded rice in Louisiana. **Agronomy Journal**. v. 102, n. 2, p. 523-529, 2010.
- LALIBERTÉ, E.; GRACE, J. B.; HUSTON, M. A.; LAMBERS, H.; TESTE, F. P.; TURNER, B. L.; WARDLE, D. A. How does pedogenesis drive plant diversity? **Trends in Ecology; Evolution**, v. 28, p. 331-340, 2013.
- LI, D. D.; LERMAN, A.; MACKENZIE, F. T. Human perturbations on the global biogeochemical cycles of coupled Si-C and responses of terrestrial processes and the coastal ocean. **Applied Geochemistry**, v. 26, p. 289-291, 2011.
- LIANG, Y., HUA, H., ZHANG, J., CHENG, C., ROMHELD, V. Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. **New Phytologist**, v. 172, p. 63-72, 2006.
- LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, G.; SONG, A. Silicon biogeochemistry and bioavailability in soil. **Silicon in Agriculture**, p. 45-68, 2015.
- LINDSAY, W. L. Chemical Equilibria in Soils. **Wiley Interscience**, 1979.
- LIRA, J. C. L. **Silício**. Brasil escola. Disponível em: <https://www.infoescola.com/elementos-químicos/silicio/> Acesso em: 15. mar. 2020.
- LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001.

- LUZ, L. D.; KALINOVSKI, E. C. Z.; PAROLI, M.; SOUZA, E. E. Estágio atual do conhecimento sobre fitólitos no Brasil. **Terrae Didática**, v. 11, n. 1, p. 52-64, 2015.
- MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H.; eds. Silicon in agriculture. **Elsevier**, v. 8, p.17-39, 2001.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 65, p. 3049-3057, 2008.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends Plant Science**, v. 11, p. 392-397, 2006.
- MADELLA, M.; ALEXANDRE, A.; BALL, T. International Code for phytolith Nomenclature 1.0. **Annales of Botany**, v. 96, p. 253-260, 2005.
- MADELLA, M.; POWER-JONES, A. H.; JONES, M. K. A simple method of extraction of opal phytoliths from sediments using a non-toxic heavy liquid. **Journal of Archaeological Science**, v. 25, p. 801-803, 1998.
- MAJUMDAR, S.; NAGABOVANALLI, P. Relationship of properties of rice and sugarcane soils and plant available silicon in Karnataka, South India. **Springer**. p. 1-14, 2021.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London. Academic Press. p. 920, 1995.
- MARSCHNER, H. **Beneficial Mineral Elements**. In: Mineral Nutrition of Higher Plantas. 2ª ed., Academic Press, London, p. 405, 434, 1995).
- MARSCHNER, H.; ROMHELD, V. In vivo measurement of root-induced pH changes at the soilroot interface: effect of plant species and nitrogen source. **Zeitschrift für Pflanzenphysiologie**, v. 111, p. 241-251, 1983.
- MARTINS, J. C.; MARTINS, E. S.; REATTO, A. Revisão de intemperismo de micás. **Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E)**, 2004).
- MATICHENCOV, V. V.; BOCHARNIKOVA, E. A.; The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: Silicon in Agriculture. Studies in Plant Science. Datnoff L. E., G. H. Snyder, and G. H. Korndörfer (eds.). Amsterdam, The Netherlands: **Elsevier**. v. 8, p. 209–219, 2001.

- MAUAD, M. **Desenvolvimento e marcha de absorção de silício em pantas de arroz sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada**. 2006. 107 p. Tese (Doutor em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu, 2006.
- MCBRATNEY, A.; FIELD, D. J.; KOCH, A. The dimensions of soil security. **Geoderma**, v. 213, p. 203-213, 2013.
- MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. **Advances in Agronomy**, v. 15, p. 339–396, 1963.
- MECCHIA, M.; PICCINI, L. Hidrogeology and SiO₂ geochemistry of the Aonda Cave System, Auyan-Tepui, Bolivar, Venezuela. **Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología**, vol. 33, p. 1-11, 1999.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v. 7, p. 317-327, 1960.
- MELLO, N. A.; Relação entre a fração mineral do solo e qualidade de sedimentos – o solo como fonte de sedimentos. In: Qualidade dos sedimentos. 2ª ed. cap 2. p. 47, 2013.
- MENEGALE, M. L. de C.; CASTRO, AMARAL, G.S.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Embrapa Amapá-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2015.
- MEURER, E. J. Fundamentos de Química do Solo. Porto Alegre: Gênese, 2000.
- MEUNIER, J. D.; COLIN, F.; ALARCON, C. Biogenic silica storage in soils. **Geology**, v. 27, p. 835–838, 1999.
- MEYER, J. H.; KEEPING, M. G. Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. **Elsevier**, v. 8 p. 257-275, 2001.
- MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. *Soil science and plant nutrition*, v. 31, n. 4, p. 625-636, 1985.
- NAGABOVANALLI, P.; KOLLALU, S.; MAJUMDAR, S. Recycling of plant silicon from crop residues in Indian Agriculture – An overview. **Indian Journal of Fertilisers**. v.18, p. 464-475, 2022.
- KRAUSKOPF, K. B. Introdução à geoquímica. 2. ed. São Paulo: Polígono, 1972.
- KORNDÖRFER, G. H. Silicon in agriculture. Elsevier Science, p. 257-276, 2001.

- MILLER, W. P.; MARTENS, D. C.; ZELASNY, L. W. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal. **Anal. Chem.**, v. 50 p. 598-601, 1986.
- MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, p. 1255-1261, 2005.
- OLIVEIRA, L. A. **Silicon in rice and beans plants: uptake, transport, redistribution and tolerance to cadmium toxicity**. 2009. 157 f. Tese (Doutorado) – Centro de energia nuclear na agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- OPFERGELT, S.; CARDINAL, D.; ANDRÉ, L.; DELVIGNE, C.; BREMOND, L.; DELVAUX, B. Variations of $\delta^{30}\text{Si}$ and Ge/Si with weathering and biogenic input in tropical basaltic ash soils under monoculture. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 74, p. 225–240, 2010.
- PARR, J. F., SULLIVAN, L. A., CHEN, B., YE, G., ZHANG, W. Carbon bio-sequestration within the phytoliths of economic bamboo species. **Glob. Chang. Biol.**, v. 16, p. 2661–2667, 2010.
- PEREIRA, H. S.; BARBOSA, N. C.; CARNEIRO, M. A. C.; KORNDORFER, G. H. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 239-247, 2007.
- PERNES-DEBUYSER, A.; PERNES, M.; VELDE, B.; TESSIER, D. Soilmineralogy evolution in the INRA 42 plots experiment (Versailles, France). **Clays and Clay Minerals**, v. 51, p. 577–584, 2003.
- PIPERNO D. R. **Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists**. Oxford: AltaMira Press, 238 p. 2006.
- RAGUENEAU, O.; LANCELOT, C.; VERVLIMMEREN, J.; COCIASU, A.; DÉLIT, G.; KRASSTEV, A.; DAOUD, N.; ROUSSEAU, V.; POPOCITCHEV, V.; BRION, N.; POPA, L.; CAUWET, G. A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy. **Global and Planetary Change**. v. 26, p. 317-365, 2000.
- RAI, D.; KITTRICK, J. A. Mineral equilibria and the soil system. **Minerals in soil environments** (eds J. Dixon; S. Weed), p. 161–198. Soil Science Society of America, Madison, 1989.
- RAIJ, B. V.; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v. 32, p. 223-236, 1973.

- RAVEN, J. A. Cycling silicon—the role of accumulation in plants. **New Phytol.** v. 158, p. 419-421, 2003.
- REIS, T. H. P.; GUIMARÃES, P. T. G.; FIGUEIREDO, F. C.; POZZA, A. A. A.; NOGUEIRA, F.D.; RODRIGUES, C.R. **O silício na nutrição e defesa de plantas.** Belo Horizonte, Epamig, 2007. (Boletim Técnico, 82).
- RENARD, K. G; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **In: US Department of Agriculture Handbook 703.** 1997.
- RENNERT, T.; LENHARDT, K. R. Does phase separation quantitatively affect Al, Fe and Si extraction from soil using acid oxalate? **Elsevier.** v. 412, 2022.
- RICHMOND, K. E., SUSSMAN, M. Got Silicon? the non-essential beneficial plant nutrient. **Curr. Opin. Plant Biol.**, v. 6, n. 268-272, 2003.
- ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN, F. S.; LAMBIN, E. F.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. **Nature.** v. 461, n. 7263, p. 472-475, 2009.
- RODRIGUES, F. A.; MCNALLY, D. J.; DATNOFF, L. E.; JONES, J. B.; LABBÉ, C.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: A potential mechanism for blast resistance. **Phytopathology**, v. 94 p. 177-183, 2004.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELSAntosHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018.
- SAUER, D.; SACCONI, L.; CONLEY, D. J.; HERRMANN, L.; SOMMER, M. Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments. **Biogeochemistry.** v. 80, n. 1, p. 98-108, 2006.
- SAUER, D.; BURGHARDT, W.; Chemical processes in soils on artificial materials: Silicate dissolution, occurrence of amorphous silica and zeolites. In: Proceedings of First International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas, **Essen.** v. 1, p. 339–346, 2006

- SAUER, D.; BURGHARDT, W. The occurrence and distribution of various forms of silica and zeolites in soils developed from wastes of iron production. **Catena**. v. 65, p. 247–257, 2006
- SAUER, D. L.; SACCONI, L.; CONLEY, D. J.; HERRMANN, L.; SOOMER, M. Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments. **Biogeochem**. v. 80, p. 89–108, 2006.
- SAVANT, N. K.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Depletion of plant-available silicon in soils: A possible causa of declining rice yields. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 28, n. 13-14, p. 1245-1252, 1997.
- SCHALLER, J., BRACKHAGE, C., PAASCH, S., BRUNNER, E., BEAUCKER, E., DUDEL, E. G. Silica uptake from nanoparticles and silica condensation state in different tissues of *Phragmites australis*. **Sci. Total Environ**, v. 442, p. 6–9, 2013.
- SCHALLER, J., KACZOREK, D., PUPPE, D., SOMMER, M. Silicon Cycling in Soils Revisited. **Plants**. v. 10. p. 295, 2021.
- SJOBERG, S. Silica in aqueous environments. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 196, p. 51-57, 1996.
- SMIL, V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. **Annual review of energy and the environment**. v. 25, n. 1, p. 53-88, 2000.
- SOMAVILLA, A.; DESSBESELL, A.; SANTOS, D. R. dos. Centrifugation methodology to extract soil solution. **Revista Scientia Agraria**, v. 18, n. 3. p. 44-47, 2017.
- SOMMER, M.; JOCHHEIM, H.; HOHN, A.; BREUER, J.; ZAGORSKI, Z.; BUSSE, J.; BARKUSKY, D.; MEIER, K.; PUPPE, D.; WANNER, M.; KACZOREK, D. Si cycling in a forest biogeosystem - the importance of transient state biogenic Si pools. **Biogeosciences**, v. 10, p. 4991-5007, 2013.
- SOMMER, M.; KACZOREK, D.; KUZYAKOV, Y.; BREUER, J. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes-a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, p. 310–329, 2006.
- SONG, Z.; LIU, C.; MULLER, K.; YANG, X.; WU, Y.; WANG, H.; Silicon regulation of soil organic carbon stabilization and its potential to mitigate climate change. **Earth Sci**. v. 185, p. 463-475, 2018a.

- SONG, Z.; LIU, H.; STROMBERG, C. A.; WANG, H.; STRONG, P. J.; YANG, X.; WU, Y.; Contribution of forests to the carbon sink via biologically-mediated silicate weathering: A case study of China. **Sci. Total Environ.** v. 615, p. 1-8, 2018b.
- SNYDER, R. Scaling down: The subnational comparative method. *Studies in comparative international development.* **Springer.** v. 36, n. 1, p. 93-110, 2001.
- SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; COSTA, C. H. M. da.; NETO, F. J.; CASTRO, G. S. A. Produção, decomposição e ciclagem de nutrientes em resíduos de crotalária e milheto, cultivados solteiros e consorciados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 10, p. 1462-1470, 2012.
- SPOSITO, G. Geochemistry in soil science. **Encyclopedia of Soil Science** (ed. W. Chesworth), p. 283-289, 2008.
- STREET-PERROTT, F. A.; BARKER, P. Biogenic silica: a neglected component of the coupled global continental biogeochemical cycles of carbon and silicon. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 33, p. 1436–1457, 2008.
- STROMBERG, C. A. E.; STILIO, V. S. di.; SONG, Z.; **Functions of phytoliths in vascular plantas: an evolutionary perspective.** v. 30. p. 1286 – 1297, 2016.
- STRUYF, E.; CONLEY, D. Emerging understanding of the ecosystem silica filter. **Biogeochemistry**, v. 107, p. 9–18, 2012.
- STRUYF, E.; SMIS, A.; VAN DEMME, S.; GARNIER J.; GOVERS, G.; VAN WESEMAEL, B.; CONLEY, DJ.; BATELANN, O.; FROT, E.; CLYMANS, W.; VANDEVENNE, F.; LANCELOT, C.; GOOS, P.; MEIRE, P. Historical land use change has lowered silica mobilization. **Nat. Comum.**, v. 1, p. 129, 2010.
- SUMMER, M. D.; JENKINS, B. M.; HYDE, P. R.; WILLIAMS, J. F.; MUTTERS, G. R.; SCARDACCI, S. C.; HAIR, M. W. Biomass production and allocation in rice with implications for straw harvesting and utilization. *Biomass Bioenerg.* v. 24, p. 163–173, 2003.
- SZCZERBAN, E.; URBANI, F.; Carsos de Venezuela. Parte 4: Formas cárnicas em areniscas pré-cambrianas del território federal Amazonas y estado Bolivar. **Boletín de la sociedade Venezolana de Espeleologia.** v. 5, p. 27-54, 1974.
- SZIKSZAY, M. Geoquímica das Águas Subterrâneas. **Boletim IG-USP Série Didática**, v. 17, n. 20, p. 1-165, 1993.

- TAMM, O. **Über die Oxalatmethode in der chemischen Bodenanalyse.** 1932.
- TEIXEIRA, R. S.; VENDRAME, P. R. S.; CHRISTONI, A. R. F.; SILVA, P. R. C. Quimica e mineralogia de um solo desenvolvido de basalto, coletado através de sondagem SPT. *Boletim de Geografia*, v. 34, n. 2, p. 116-126, 2016.
- TISDALE, S. L.; BEATON, J. D.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers.** 4.ed. New York: Mac Millan, 1985.
- TOLEDO, M. C. M.; TAKAYAMA, C. H.; BOUROTTE, C. L. M. Intemperismo simulado em animação gráfica. *Terrae Didactica*. v. 10, n. 3, p. 351-356, 2014.
- TOMA, E. H.; **Elementos químicos e seus compostos.** 3. ed. São Paulo: Bluncher, 2013.
- TUBANA, B.; BABU, T.; LAWRENCE E DATNOFF, A review of silicon in soils and plants and its role agriculture: history and future perspectives. *Soil Science*. v. 181, n. 9-10, p. 1-19, 2016.
- VANDEVENNE, F.; STRUYF, E.; CLYMANS, W.; MEIRE P. Agricultural silica harvest: have humans created a new loop in the global silica cycle? *Front. Ecol. Environ.*, v. 10, p. 243-248, 2012.
- VANDEVENNE, F.; STRUYF, E.; CLYMANS, W.; MEIRE, P. Agricultural silica harvest: have humans created a new loop in the global silica cycle? *Front. Ecol. Environ.*, v. 10, p. 243-248, 2012.
- VELDE, B.; PECK, T. Clay minerals changes in the Morrow experimental plots, University of Illinois. *Clays and Clay Minerals*, v. 50, p. 364-370, 2002.
- WEBB E. A., LONGSTAFFE F. J. The oxygen isoto-pic compositions of silica phytoliths and plant water in grasses: implications for the study of paleoclimate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 64 p. 767-780, 2000.
- WEDEPOHL, K. H. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta* 1995, 59, 1217–1232
- WHITE, A. F.; VIVIT, D. V.; SCHULZ, M. S.; BULLEN, T. D.; EVETT, R. R.; AAGARWAL; J. Biogenic and pedogenic controls on Si distributions and cycling in grasslands of the Santa Cruz soil chronosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 94, p. 72–94, 2012.

WIEGAND, J.; FEY, M.; HAUS, N.; KARMANN, I. Investigações Geoquímicas e hidroquímicas da gênese de carste em arenitos e quartzitos da Chapada Diamantina e Quadrilátero Ferrífero. **Z. Dt. geol. Ges**, vol. 155, p. 61-90, 2004.

WRAY, R. A. L. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. **Earth-Science Reviews**, vol. 42, p. 137-160, 1997a.

YAMAJI, N.; MITANI, N.; MA, J. F. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. **The Plant Cell**, v. 20, p. 1381 – 1389, 2008.

YARIV, S.; CROSS, H. **Geochemistry of Colloid Systems for Earth Scientists**. 1979.

ZABOWSKI, D.; UGOLINI, F. C. Seasonality in the mineral stability of a subalpine Spodosol. **Soil Science**, v. 154, p. 497–504, 1992.

ANEXOS

Anexo I: Análise da variância das variáveis avaliadas no trabalho

Tabela 7: Análise da variância das variáveis avaliadas. Passo Fundo – RS, 2022.

Variável resposta	DF	S.Q	S.Q.M	Valor de F	Pr (>F)	CV%
Si	3	10,75	3,58	4,37	0,02 *	11,03
Si_{ad}	3	214,31	71,44	3,04	0,06	19,33
Si_{org}	3	5.318,5	1.772,84	12,79	0,0003 *	32,27
Si_{occ}	3	91,89	30,63	2,07	0,151	17,60
Si_{ta}	3	4.456.457	1.485.486	4,44	0,02 *	18,96
Si_{ft}	3	4.717.616	1.572.539	4,62	0,02 *	18,96
Si_{tot}	3	780,58	260,19	25.447,00	2,97 ^{e-16} *	2,55
Argila	1	1.664,2	1.664,24	3,22	0,09	7,18
Silte	1	2.450,8	2.450,8	12,01	0,004 *	5,91
Areia	1	7.631,6	7.631,6	12,51	0,003 *	9,59
Areia muito grossa	1	455,01	455,01	9,32	0,038 *	33,86
Areia grossa	1	313,56	313,56	6,31	0,066	35,00
Areia média	1	23,503	23,503	1,41	0,301	24,58
Areia fina	1	11746,4	11746	110,87	0,002*	31,53
Areia muito fina	1	706,89	706,89	130,86	0,0014*	43,22

* Resultados apresentam significância através do modelo linear a 5%.

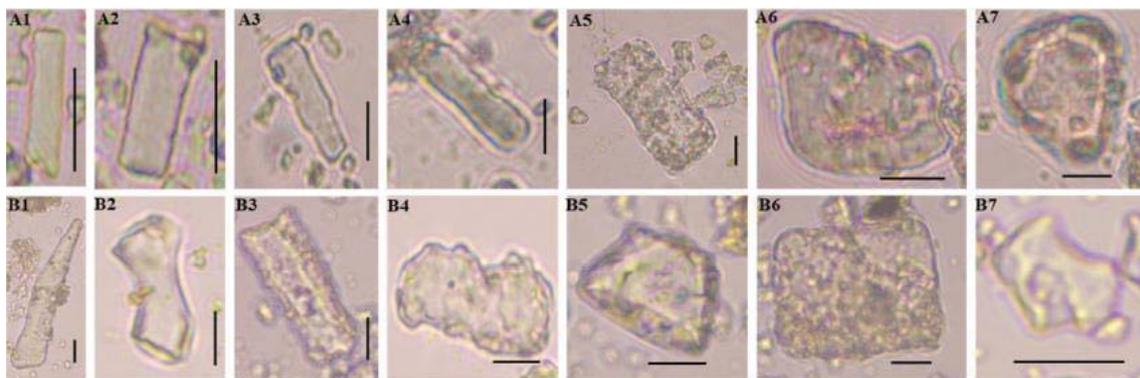
Si_i: silício móvel; Si_{ad}: silício adsorvido; Si_{org}: silício associado à matéria orgânica do solo; Si_{occ}: silício ocluso em sesquióxidos de Fe e Al; Si_{ta}: sílica amorfa; Si_{ft}: soma das frações de silício extraídas quimicamente; Si_{tot}: silício total.

Anexo II: Principais formas e características dos fitólitos

Tipo	Táxon	Ambiente	Representação (MADELLA et al., 2005)
<i>Bilobate short cell</i> (<i>dumbbell</i>) (Barboni et al., 1999)	<u>Gramíneas</u> sobretudo Panicoideae alta C ₄ , também algumas Panicoideae C ₃ ; Chloridoideae, Arundinoideae e Bambusoideae	Quente úmido Áreas à sombra, sob o dossel de florestas tropicais	
<i>Saddle</i> (BARBONI et al., 1999)	<u>Gramíneas</u> sobretudo Chloridoideae baixas C ₄ ; algumas Bambusoideae C ₃ , Arundinoideae C ₃	Regiões secas de baixa latitude e altitude ou condições edáficas	
<i>Rondel</i> (<i>conical, circular</i>) (BARBONI et al., 1999)	<u>Gramíneas</u> sobretudo Pooideae C ₃ , também Bambusoideae C ₃	Regiões temperadas, frias e altas elevações intertropicais	
<i>Elongate echinate long</i> <i>Cell</i> (<i>elongate spiny</i>) (BARBONI et al., 1999)	<u>Gramíneas</u> <i>long cells</i> de todas as gramíneas		
<i>Elongate psilate</i> (<i>elongate smooth</i>)	<u>Gramíneas</u> <i>long cells</i> de todas as gramíneas		
<i>Cylindrical polylobate</i>	<u>Gramíneas</u> predominam nas Panicoideae (C ₄ e C ₃)	Clima quente úmido	
<i>Trapeziform short-cell</i> (<i>rectangular</i>)	<u>Gramíneas</u> Pooideae	Regiões temperadas, frias e altas elevações intertropicais	

Fonte: Luz et al. (2015)

Anexo III: Formas de fitolíticas encontradas em campo nativo (A) e lavoura de 40 anos
(B)



Fonte: DALACORTE (2022).

A1: Elongate cavate; A2: Elongate sinuate; A3 Elongate cavate; A4: Cylindric sinuate; A5: Rectangular aerolate; A6: Rectangular nodulate; A7: Globular nodulate. B1: Acicular; B2: Saddle; B3: Elongate smooth; B4: Bilobate; B5: Rondel; B6: Rectangular; B7: Saddle. Escala: 25 μ m. Passo Fundo, 2020.



PPGAgro

Programa de Pós-Graduação em Agronomia

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - FAMV

