

AÇÃO DE MICRORGANISMOS FÚNGICOS NO INTEMPERISMO DE
GRANITO DA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

LEONARDO VILQUER DE SOUZA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
AGOSTO 2022

AÇÃO DE MICRORGANISMOS FÚNGICOS NO INTEMPERISMO DE
GRANITO DA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

LEONARDO VILQUER DE SOUZA

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.”

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Ramatis Pugliese Andrade

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
AGOSTO 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S729

Souza, Leonardo Vilquer de.

AÇÃO DE MICRORGANISMOS FÚNGICOS NO INTEMPERISMO DE GRANITO NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO / Leonardo Vilquer de Souza. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2022.

89 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2022.

Orientador: Gabriel Ramatis Pugliese de Andrade.

1. Intemperismo de Granito. 2. Microrganismos. 3. Aspergillus sp.. 4. Fusarium sp.. 5. Trichoderma sp.. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

AÇÃO DE MICRORGANISMOS FÚNGICOS NO INTEMPERISMO DE GRANITO
NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

LEONARDO VILQUER DE SOUZA

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.”

Aprovada em 01 de agosto de 2022

Comissão Examinadora:

Prof. Lucas Resmini Sartor (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) – UFS

Prof.^a Luciana Aparecida Rodrigues (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF

Prof. Marco Antonio Martins (Ph.D., Microbiologia do Solo) – UENF

Prof. Gabriel Ramatis P. Andrade (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) – UENF
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas graças e bençãos concedidas.

Aos meus pais, José e Creuza, que sempre estiveram ao meu lado, torcendo pelo meu sucesso (e me perguntando quando eu iria terminar). Pronto, pai, mãe! Chegamos ao final!

Aos meus irmãos, Rosimar e José Lucas, por serem os meus melhores amigos e por estarem sempre comigo, mesmo que distantes.

Ao meu marido José Junior agradeço por todo amor, incentivo e paciência ao longo desse período. Obrigado por ser essa pessoa incrível, por estar sempre comigo e não me deixar desistir (inúmeras vezes).

Sou grato também aos meus familiares e amigos, por todo o carinho, pela torcida e também por trazerem momentos de leveza nos períodos mais difíceis.

Minha imensa gratidão ao meu professor orientador Doutor Gabriel Ramatis Pugliese Andrade, por todo o ensinamento transmitido ao longo do curso, pelas sugestões e críticas que muito contribuíram para o meu aprendizado. Obrigado também pelo incentivo e pela paciência.

Agradeço ao professor Doutor Fábio Lopes Olivares, do Laboratório de Biologia Celular e Tecidual (LBCT/CBB/UENF), pela gentileza de ter cedido os microrganismos que foram usados neste trabalho.

Agradeço ainda ao professor Doutor Silvado Felipe da Silveira, do Laboratório de Entomologia e Fitopatologia (LEF/CCTA/UENF), pelas inúmeras

contribuições e sugestões com o desenvolvimento do trabalho e também por ceder o espaço na Clínica Fitossanitária para que eu pudesse desenvolver boa parte do projeto lá.

Ao professor Doutor Valdomiro Severino de Souza Júnior, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, pelo uso do DRX e FRX.

Ao técnico da Clínica Fitossanitária, Doutor Vicente Mussi Dias, agradeço imensamente pela ajuda na realização dos experimentos e por todos os ensinamentos e conselhos.

À professora Doutora Luciana Aparecida Rodrigues, do Laboratório de Solos (LSOL), por ter sido sempre muito solícita e ter me ajudado com as análises com os dados.

Ao José Moreira, pela ajuda com os experimentos na Clínica Fitossanitária e ao José Olívio pela ajuda com o programa de análises estatísticas.

Aos membros da banca examinadora, professores Cláudio Roberto Marciano (UENF), Laura Mathias Barroso (UENF), Lucas Resmini Sartor (UFS), Luciana Aparecida Rodrigues (UENF), Marco Antonio Martins (UENF) e Silvaldo Felipe da Silveira (UENF), meu agradecimento pela disponibilidade em participar da banca de defesa e pela revisão da tese.

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e ao Laboratório de Solos, pela oportunidade de desenvolver este trabalho. Expresso também o meu agradecimento à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Microrganismos fúngicos e o intemperismo biológico	4
2.2 Granitos.....	6
2.3 Os microrganismos fúngicos como objeto de estudo	9
2.3.1 O gênero <i>Aspergillus</i>	9
2.3.2 O gênero <i>Fusarium</i>	10
2.3.3 O gênero <i>Trichoderma</i>	11
3. OBJETIVOS	13
3.1 Objetivo geral.....	13
3.2 Objetivos específicos.....	13
4. MATERIAL E MÉTODOS	14
4.1 Coleta e amostragem de rocha	14
4.2 Preparo das amostras de rocha.....	16
4.3 Caracterização mineralógica por difração de raios-x	16
4.4 Isolados de fungos, cultivo e inoculação	16

4.5 Análise química dos meios de cultura por ICP-OES	18
4.6 Análises estatísticas	19
5. RESULTADOS	20
5.1 Caracterização química e mineral da rocha.....	20
5.2 Medição de pH dos tratamentos e biomassa fúngica.....	23
5.3 Análises química do meio por ICP-OES	24
5.4 Análises estatísticas.....	27
6. DISCUSSÃO.....	40
6.1 Medição do pH dos tratamentos e biomassa fúngica.....	40
6.2 Liberação de elementos no meio e alteração mineral nos experimentos....	43
7. RESUMOS E CONCLUSÕES.....	54
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
APÊNDICES.....	64

RESUMO

DE SOUZA, Leonardo Vilquer. M.Sc. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Março de 2022. Ação de microrganismos fúngicos no intemperismo de granito na região norte do Estado do Rio de Janeiro. Orientador: Prof. Dr. Gabriel Ramatis Pugliese Andrade.

O processo de intemperismo ocorre quando o conjunto de ações físicas, químicas e biológicas causa a desagregação e a decomposição das rochas ao longo dos anos. A partir do intemperismo, ocorre a pedogênese. No contexto do intemperismo e da pedogênese, é reconhecido que a alteração mineral é, em grande parte, mediada por microrganismos que fornecem substâncias químicas e desenvolvem processos biológicos que alteram as taxas de desintegração da superfície das rochas. Embora os fungos sejam importantes componentes das comunidades microbianas, presentes nas superfícies das rochas, pouco se sabe sobre estes componentes quanto às suas estruturas, como as hifas por exemplo, em superfícies minerais e às interações com o substrato rochoso em ambientes tropicais úmidos. Assim, o objetivo deste projeto foi: i) avaliar o desenvolvimento de três gêneros fúngicos (*Aspergillus spp.*, *Trichoderma spp.* e *Fusarium spp.*) em meio contendo pó de rocha derivado de um granito coletado na região do Morro do Itaoca, município de Campos dos Goytacazes – RJ, em afloramentos rochosos

com vegetação em estágio inicial de sucessão, sob condições de esterilização do pó de rocha (autoclavagem) e sem o processo de esterilização; ii) realizar a caracterização mineralógica da rocha granítica; iii) estabelecer a relação desses fungos com os componentes minerais que constituem o granito; iv) inferir sobre as transformações geoquímicas dos granitos e correlaciona-los com a composição mineralógica e química da rocha. Os fungos foram plaqueados em meio de cultura mínimo, sem a adição de compostos nutricionais suficientes para o seu crescimento e retirados para seguimento nos experimentos após um intervalo de 30 dias. A análise da composição mineralógica das amostras de rochas foi realizada de forma qualitativa através da técnica de DRX e a caracterização em relação aos seus elementos principais por meio de espectrometria de fluorescência de raios-x. Verificou-se que os granitos presentes na região do Morro do Itaoca, em Campos, possuem entre os seus minerais, principalmente os silicatos, como quartzo (SiO_2), plagioclásio ($(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$) e biotita ($(\text{K}(\text{MgFe}^{2+})_3(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2)$). Foi possível verificar também que os fungos tiveram maior biomassa nos tratamentos onde o pó de rocha não foi autoclavado, embora não tenha sido diferente estatisticamente e que, *Aspergillus* e *Fusarium* possuem uma capacidade maior de disponibilização de alguns elementos, como Al, Fe, Mg e P, do que o *Trichoderma*. Para outros elementos, como Ca, Na e Si, embora fosse esperada alguma ação, não foram apresentadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos para nenhum dos fungos. Para Mn e S, os teores de solubilização foram bastantes baixos, o que está em conformidade com a mineralogia da rocha. Esta pesquisa traz importantes abordagens em relação à composição do granito do Morro do Itaoca e de alguns microrganismos fúngicos comumente encontrados no solo e que podem desempenhar um papel notável no biointemperismo dessas rochas em regiões com vegetação em estágio inicial de sucessão.

ABSTRACT

DE SOUZA, Leonardo Vilquer. M.Sc. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. March 2022. Action of fungal microorganisms in the granite weathering in the Northern Region of the State of Rio de Janeiro. Advisor: Prof. Dr. Gabriel Ramatis Pugliese Andrade.

The weathering process occurs when the set of physical, chemical and biological actions causes the disintegration and decomposition of rocks over the years. From weathering, pedogenesis occurs. In the context of weathering and pedogenesis, it is recognized that the mineral alteration is largely mediated by microorganisms that supply chemical substances and develop biological process that boost the disintegration rates of rock surface. Although fungi are important components of microbial communities, present on the surfaces of rocks, little is known about these components, such as hyphae, regarding their structures on mineral surfaces and interactions with the rock substrate in humid tropical environments. Thus, the objective of this work was: i) to evaluate the development of three fungal genres (*Aspergillus* spp., *Trichoderma* spp., and *Fusarium* spp.) in medium containing rock powder derived from a granite collected in the region of Morro do Itaoca, county of Campos dos Goytacazes – RJ, in rock outcrops with vegetation in the early stage of succession, under conditions of sterilization of the rock powder (autoclaving) and without the sterilization process; ii) to carry out the mineralogical

characterization of the granitic rock; iii) iii) establish the relationship between these fungi and the mineral components that constitute the granite; iv) infer about the geochemical transformations of the granites and correlate them with the mineralogical and chemical composition of the rock. The fungi were plated growing medium in minimum culture, without the addition of sufficient nutritional compounds for their growth and removed for the next experiments after an interval of 30 days. The analysis of the mineralogical assemblage of the rock samples was performed qualitatively through the XRD technique and the characterization in relation to its main elements through X-ray fluorescence spectrometry. It was found that the granites present in the region of Morro do Itaoca, in Campos, have among their minerals, mainly silicates, such as quartz (SiO_2), plagioclase ($(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$) and biotite ($\text{K}(\text{MgFe}^{2+})_3(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$). It was also possible to verify that the fungi had higher biomass in the treatments where the rock powder was not autoclaved, although it was not statistically different and that *Aspergillus* and *Fusarium* have a greater capacity to make some elements available, such as Al, Fe, Mg and P, than *Trichoderma*. For other elements, such as Ca, Na and Si, although some action was expected, there were no statistically significant differences between treatments for any of the fungi. For Mn and S, the solubilization contents were quite low, which is in accordance with the mineralogy of the rock. This research brings important approaches in relation to the composition of the granite of Morro do Itaoca and some fungal microorganisms commonly found in the soil and that can play a notable role in the bioweathering of these rocks in regions with vegetation at an early stage of succession.

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais se reconhece que o intemperismo de minerais é mediado por fatores químicos e processos biológicos (Barker et al., 1996; Bennett et al., 1996; Ehrlich 1998; Frankland et al., 1990). Muitos fatores (bióticos e abióticos) podem influenciar as transformações que ocorrem na Terra. A desintegração da rocha por meio dos processos de intemperismo do constituinte mineral é um processo indispensável na formação dos solos e sedimentos, na determinação da composição química de ambientes aquáticos e também na regulação de clima (Barker, 1998).

O intemperismo é uma fonte imprescindível de novos nutrientes quando a circulação daqueles antes disponíveis por meio da decomposição de matéria orgânica já não é o suficiente para manter a fertilidade e a produção de um ecossistema (Finlay et al., 2009). Fungos ectomicorrízicos, por exemplo, têm a capacidade de promover alteração no ambiente químico por meio de acidificação ao redor das hifas (principalmente em suas pontas) e pela exsudação de agentes complexantes de metais, como ácidos orgânicos (Rosling et al., 2009) e sideróforos (Winkelmann, 2007).

A ação de microrganismos como agentes intempéricos, causando a destruição mecânica e a dissolução química das rochas, ocorre durante o seu crescimento e reprodução, promovendo a transição rocha-solo, trazendo

benefícios para os ambientes terrestres (Xiao et al., 2012), por meio de enzimas importantes que estão envolvidas em reações de transformações no solo, como por exemplo as hidrolases e oxirredutases. Essas enzimas são responsáveis por controlar os processos de decomposição dos materiais orgânicos, assim como as transformações inorgânicas. Elas também são capazes de promover a quebra de ligações químicas, reações de oxirredução, transferências de constituintes e também a adição ou remoção de grupos químicos, representando a base das transformações químicas do solo (Moreira; Siqueira, 2006).

Os fungos que habitam as rochas estão entre os organismos com maior tolerância ao estresse na Terra, capazes de lidar com a variedade de estressores associados às rochas nuas em ambientes de extremos quentes e frios (Tesei et al., 2012). Essas superfícies são habitats únicos onde mudanças rápidas na radiação, temperatura, água e disponibilidade de nutrientes representam um desafio para a sobrevivência microbiana em diferentes ambientes, em vários lugares do mundo (Gueidan et al., 2008).

Dados geoquímicos, fósseis e genéticos apontam para a importância das interações micróbio-rocha no início da história da Terra, especialmente para a ciclagem e distribuição de nutrientes que sustentam a vida e os principais elementos litogênicos (Wu, et al., 2008).

Quartzo, feldspatos, mica e calcita fazem parte da composição dos granitos (Menezes et al., 2002). Assim, do ponto de vista mineralógico, pode-se constatar que o resíduo de beneficiamento do granito possa vir a conter teores significativos de alguns elementos químicos importantes, considerados macro e micronutrientes para as plantas. Dentre os macronutrientes, há o cálcio (Ca), o potássio (K) e o magnésio (Mg). Entre os micronutrientes, o Fe está presente no resíduo devido à utilização da limalha. Apesar da presença de alguns nutrientes, é também possível que o resíduo de beneficiamento desta rocha apresente teores elevados de alguns elementos considerados tóxicos para as plantas, como o cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni) e também o chumbo (Pb) (Guarçoni, 2011).

As interações ecossistema-base de rocha alimentam os ciclos biogeoquímicos da crosta rasa da Terra, apoiando a vida, estimulando a transformação do substrato e estimulando a inovação evolutiva. Embora os processos oxidativos tenham dominado metade da história terrestre, a

contribuição relativa da biosfera e suas impressões digitais químicas no regolito em desenvolvimento da Terra ainda são pouco restritas (Zaharescu 2019).

Uma melhor compreensão das interações fungos-granito, como por exemplo, por meio da perspectiva de balanços de massa de solutos ou fenômenos de escala global, pode ser obtida por meio de simulações de laboratório, onde hipóteses podem ser testadas sob condições experimentais controladas (Wu, 2008). Assim, investigamos as taxas de liberação elementar durante a interação de espécies de fungos (*Aspergillus* sp., *Fusarium* sp. e *Trichoderma* sp.) com granito.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Microrganismos fúngicos e o intemperismo biológico

O intemperismo biológico, também chamado de deterioração, ocorre sob a influência das atividades de vida dos organismos. Os processos orgânicos envolvem a dissolução biológica de rochas através das atividades bacterianas, dos ácidos húmicos e da bioerosão ou destruição. As mudanças ocorrem pelo crescimento de raízes e penetração em organismos de conchas, líquens, cianobactérias, algas e fungos nas rochas que eles nutrem. As grandes áreas onde esses organismos vivem e suas atividades prolongadas durante o período geológico destroem quantidade significativa das rochas (Haldar, 2020).

Especificamente sobre os fungos, estudos mostraram que esses organismos podem intemperizar os minerais e possibilitar a liberação de potássio (K) de silicatos e alumínio das rochas (Banfield et al., 1999; Glowa et al., 2003; Adeyemi e Gadd, 2005; Smits et al., 2009). Fungos micorrízicos, por exemplo, ectotróficos que têm a capacidade de dissolver flogopita e vermiculita para a liberação de K (Yuan et al., 2004). A absorção de fósforo (P) e K por esses fungos micorrízicos demonstram que o efeito que eles causam no intemperismo vai depender de alguns fatores, como: o tipo de rocha onde eles se encontram, o

tamanho do grão, a produção de ácido orgânico e o tipo de contato estabelecido (Adeleke et al., 2010).

Os ácidos orgânicos de baixo peso molecular (*low molecular weight organic acids*, LMWOA), produzidos pelas raízes das plantas e pelos microrganismos do solo, são mais eficazes na dissolução de minerais que os ácidos de médio e alto peso molecular, oriundos de substâncias húmicas, mesmo os primeiros constituindo uma fração que ocorre em menor quantidade (Ochs, 1996). Os LMWOA são importantes para o processo de intemperismo biológico devido à sua capacidade acidificante e complexante. A depender do número e da configuração dos grupos carboxílicos e fenólicos e da força do ácido relacionado, os ácidos orgânicos liberam H^+ para a protonação da superfície mineral e íons quelatos (Barker et al., 1998). O poder de intemperismo dos ácidos orgânicos pode ser até 3-5 vezes maior do que o de ácidos inorgânicos, o que em parte se deve à capacidade de formar complexos que aumentam a solubilidade de metais na solução (Banfield et al., 1999; Paris, 1996; Paris et al., 1995).

Vários LMWOA podem ser liberados pelas plantas, bactérias e fungos, sendo os mais importantes deles o ácido oxálico, o cítrico e o málico, que são quelantes mais fortes de metais trivalentes, como Al^{3+} e Fe^{3+} . O ácido oxálico é o mais forte e forma complexos com potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), alumínio (Al) e ferro (Fe), sendo comumente produzido em grandes quantidades por muitas espécies de fungos (Dutton e Evans, 1996).

O ácido oxálico também já foi avaliado na liberação de K^+ de vermiculita com hidróxi entrecamadas (Comerford et al., 1990) e de outros minerais contendo K (Song e Huang, 1988). O oxalato tem sido associado também ao intemperismo de filossilicatos 2:1 saturados por Ca. Também foi observado que o fungo *Aspergillus niger* (não micorrízico) é capaz de intemperizar o mineral biotita (grupo da mica) e causar alterações nos minerais através do ácido (Paris et al., 1995).

Estudos publicados nos últimos 10 anos, usando AFM (do inglês *Atomic Force Microscopy* – Microscopia de Força Atômica), CLSM (*Confocal Laser Scanning Microscopy* – Microscopia Confocal de Varredura a Laser), espectroscopia de raios-X de energia dispersiva e interferometria de varredura vertical, mostraram que os fungos alteram a estrutura dos substratos minerais. As assinaturas endolíticas (aquelas que estão no interior das rochas), de

microrganismos podem ser distinguidas de estruturas de origem abiótica, no entanto, a contribuição proporcional de túneis e os vazios em relação ao intemperismo biológico total é provavelmente baixa, uma vez que seu volume e área de superfície interna são pequenos em comparação com a superfície mineral total exposta ao contato microbiano (Finlay et al., 2020).

A ocorrência de poros tubulares foi demonstrada em minerais de solos superficiais de podzol e rochas graníticas rasas sob florestas de coníferas, na Europa (van Breemen et al., 2000; Jongmans et al., 1997; Landeweert et al., 2001). Alguns desses poros foram encontrados ocupados por hifas fúngicas, e os autores especularam que eles poderiam ser formados pela ação de intemperismo de hifas (possivelmente em associação com bactérias) liberando ácidos orgânicos e sideróforos (Finlay et al., 2020).

O granito é o tipo de rocha encontrado com maior frequência na crosta terrestre, podendo ser observados afloramentos expostos na superfície pela erosão das cadeias de montanha (Lamaguti, 2001). Estudos *in vitro* de mobilização de cátions de base de partículas de granito até agora sugerem que fungos micorrízicos simbióticos podem ter maior eficiência na mobilização de elementos como o Mg, o K e o P do que fungos saprotróficos, no entanto, é necessário testar uma gama mais ampla de espécies antes que conclusões tão amplas possam ser tiradas (Finlay, 2020). Devido à sua grande abundância na região norte fluminense, o granito foi utilizado como objeto de estudo para este trabalho.

2.2 Granitos

O granito é um dos tipos de rocha mais comumente encontrado e que cobre uma enorme área da crosta terrestre. Seu nome vem da palavra latina *granum*, que quer dizer grão. As composições geoquímicas dos granitóides refletem as condições físicas de sua formação e a natureza de sua origem. As características geoquímicas e geocronológicas dos granitóides arqueanos e rochas relacionadas, e suas implicações para a avaliação do início das placas tectônicas de estilo moderno, têm sido objeto de extensa pesquisa e intensa especulação por décadas (Halla et al., 2016).

O manto arqueano era mais quente, o que provavelmente resultou em um tipo diferente de placas tectônicas, com placas basálticas mais espessas (van Hunen e van den Berg, 2008) de tamanho menor e manto com taxas de convecção mais rápida, ou seja, transferindo uma quantidade maior de calor de um local para o outro através dos fluidos. A geoquímica distinta dos granitos, arqueanos e recentes, reflete as diferenças entre processos tectônicos antigos e modernos (Joshi et al., 2017).

Esquemáticamente, um segmento da crosta terrestre arqueana consiste em três litologias discordantes: (i) os chamados “gnaisses cinzentos”, um complexo, assembleia deformada e frequentemente migmatítica de metassedimentar e rochas meta-ígneas, cujos principais componentes (Moyen, 2011) são gnaisses granitoides de baixo teor de K da série tonalito-trondhjemita-granodiorito ‘TTG’ (Jahn et al., 1981); (ii) rochas supracrustais, meta-vulcânicas e metassedimentares formando cinturões de pedras verdes; (iii) plútons e batólitos granitoides tardios e geralmente de alto teor de K, tipicamente intruso às duas litologias anteriores. Esses granitoides geralmente representam o último evento geológico arqueano em cada cráton em todo o mundo (Condie, 1981; Heilimo et al., 2011; Martin, 1994; Moyen et al., 2003).

Embora haja muita controvérsia em relação às classificações baseadas na petrogênese dessas rochas, atualmente existe um consenso geral no uso da nomenclatura descritiva dos granitoides sugerida por Streckeisen (1976; 1967) e que levou a designar o mesmo nome para granitoides com proporções relativas semelhantes de minerais félsicos (quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino) independentemente de qualquer implicação genética (Barbarin, 1990).

A classificação principal (sugerida por Bas & Streckeisen, 1991; Streckeisen, 1974, 1976) é baseada em um triângulo duplo (figura 1). Este diagrama, apropriado para rochas com 10% ou mais de quartzo ou minerais feldspatoides mais feldspatos, faz uso de proporções modais (volume) de quartzo (Q), que é soma dos polimorfos de sílica, incluindo as variedades de quartzo de baixa e alta temperatura, de álcalis feldspatos (A), que reúne os feldspatos alcalinos, de plagioclásio (P), que reúne os plagioclásios com composição de anortita entre 5 e 100% e escapolita e feldspatoides (F), que é a soma destes, para nomear as rochas.

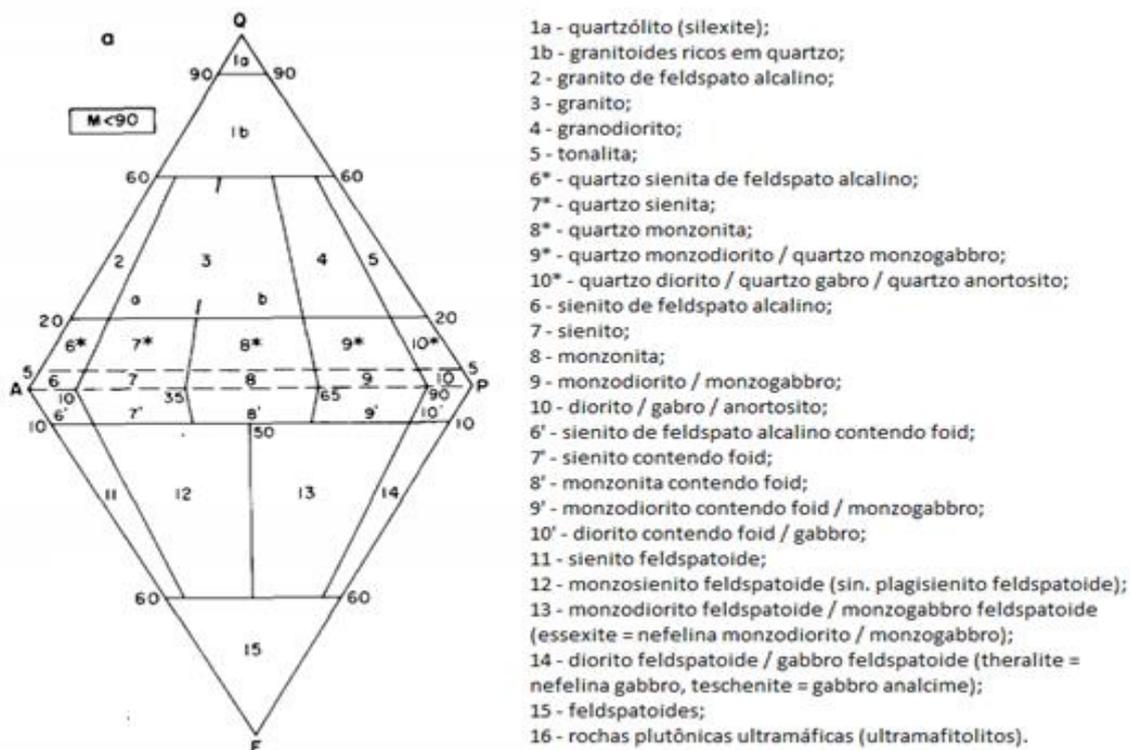


Figura 1. Classificação geral e nomenclatura de rochas plutônicas de acordo com o conteúdo mineral (em % vol.). $Q + A + P = 100$, ou $A + P + F = 100$.
 Legenda: Q: quartzo; A: álcalis feldspatos; P: plagioclásios; F: feldspatoides;
 Extraído e adaptado de Streckeisen, 1976.

Em Campos dos Goytacazes, a geologia do Morro do Itaoca integra um conjunto de corpos ígneos de idade Cambriana-Ordoviciano e está relacionada ao estágio final da colisão continental que deu origem ao supercontinente conhecido como Gondwana, onde África e América do Sul foram unidas numa única massa continental (Valeriano et al., 2016) e encontra-se no cinturão de dobramentos e empurrões gerado no Neoproterozoico/Cambriano, denominado Faixa Ribeira (Cordani et al., 1973; Almeida et al., 1973).

A colisão continental que formou o Gondwana teve várias etapas ao longo de milhões de anos e, durante esse processo, houve condições de altas pressões e temperaturas, o que propiciou a deformação das rochas e mudança de seus minerais. A composição das rochas do Itaoca (produto da fusão dos antigos continentes que colidiram) é semelhante à da crosta continental (Potratz e Valeriano, 2017).

2.3 Microrganismos fúngicos como objeto de estudo

2.3.1 O gênero *Aspergillus*

O gênero *Aspergillus* apresenta mais de 300 espécies aceitas (Samson et al., 2014), estando amplamente distribuído na natureza, especialmente no ar, no material orgânico em decomposição, no solo, na água e nos alimentos. Somando à sua ampla distribuição, os fungos do gênero *Aspergillus* apresentam conidiogênese enteroblástica do tipo fialídica, permitindo que eles tenham alta capacidade de esporulação (Bulpa et al., 2007).

O intemperismo biológico é considerado um mecanismo secundário de degradação das superfícies rochosas (Becker et al., 1994). Segundo Erlich (2009), alguns organismos microbiológicos são capazes de solubilizar silicatos como, por exemplo, fungos do gênero *Aspergillus*. O autor indica que o ataque às rochas pode ocorrer, principalmente, de quatro formas diferentes: por meio da produção de substâncias quelantes; da produção de ácidos orgânicos ou inorgânicos; produção de bases e através da produção de material polissacarídeo extracelular.

No primeiro caso, da produção de substâncias quelantes, elas são oriundas do metabolismo e são capazes de complexar os cátions dos silicatos quando o meio está próximo da neutralidade. Aqui, pode-se citar o 2-cetoglutarato, ácido glucônico, ácido cítrico e o ácido pirúvico.

No segundo caso, a secreção de ácidos orgânicos tem o maior potencial de intemperizar silicatos quando comparados aos ácidos minerais. Isto ocorre devido ao fato de que os ácidos orgânicos apresentam tanto o efeito corrosivo, intrínseco à substância, em regiões de baixo pH, quanto o efeito quelante em meio levemente ácido. Por isso, este tipo de corrosão pode acelerar a degradação, visto que pode haver uma combinação entre os dois mecanismos. Neste processo, podem-se citar os ácidos oxálicos, cítrico e pirúvico.

No terceiro caso (produção de bases), as condições alcalinas também favorecem a quebra da ligação Al-O e Si-O, visto que ambas podem sofrer ataques nucleofílicos. No último caso, o material polissacarídeo extracelular pode reagir com a superfície siloxana para formar compostos orgânicos derivados,

podendo ocorrer tanto na presença de bactérias quanto na de fungos (Ehrlich et al., 2015).

O fungo *Aspergillus* é conhecido por solubilizar fosfato de rochas (Franco, 1995; Illmer e Schinner, 1992; Silva et al., 2002; Whitelaw, 2000) por dissolução direta de fósforo ou como quelante catiônico, liberando fosfato solúvel (Cerezine et al., 1988; Sperber, 1958). É conhecido por sua capacidade de produzir ácido orgânico, especificamente a produção industrial de ácido cítrico (Grewal e Kalra, 1995; Matthey, 1992) que foi reconhecida como uma das mais eficazes para a solubilização de rochas fosfáticas (Abd-Alla et al., 2014; Goenadi & Sugiarto, 2000).

A produção de ácidos orgânicos por *A. niger*, por exemplo, é dependente do pH do meio, uma vez que as maiores quantidades de ácido oxálico são produzidas a um pH entre 5 e 8, embora esteja completamente ausente abaixo de pH 3,0 (Ruijter et al., 1999). Em relação ao ácido cítrico, a produção começa em pH 3,0, mas é ótima abaixo de 2,0 (Karaffa & Kubicek, 2003) e o ácido glucônico é melhor produzido em pH 5,5, embora uma faixa de pH 2–8 tenha sido encontrada (Witteveen et al., 1993). Muitas cepas de *A. niger* são bem conhecidas por sua capacidade de produzir ácido cítrico em condições adequadas, ou seja, em um pH baixo-médio e com aeração, em fermentação submersa e em estado sólido (Carvalho et al., 2005). Esta espécie é de fácil manuseio e capaz de utilizar uma grande variedade de matérias-primas de baixo custo com alto rendimento (Grewal & Kalra, 1995).

2.3.2 O gênero *Fusarium*

Fusarium é um fungo filamentosos, com ampla distribuição geográfica, ocorrendo principalmente nas plantas e no solo. É encontrado na micoflora normal de *commodities*, como arroz, feijão, soja e outras culturas (Pitt et al., 1994). Foi descrito por Link ex Gray em 1821. Pertence à família Hypocreaceae, ordem Hypocreales, filo Ascomycota, reino Fungi (Alexopoulos et al., 1996).

Embora abundantes em solos, as comunidades de *Fusarium* podem variar em termos de diversidade de espécies, dependendo das culturas, características físico-químicas do solo, condições climáticas e influência de

atividades humanas (Bateman e Murray, 2001; Steinkellner e Langer, 2005; Summerell et al., 2010). Já foi demonstrado, por exemplo, que a densidade populacional destes fungos diminui com o aumento da profundidade do solo (Rodríguez-Molina et al., 2000).

A persistência do *Fusarium* na camada superior do solo pode ser favorecida, uma vez que está ligada à existência de restos de plantas e húmus (Nash et al., 1962). Embora muitos fatores possam apresentar influência sobre estes microrganismos, como a textura (Liebhard, 1993a), a disponibilidade de nutrientes (Liebhard, 1993b), densidade do solo, volume de poro, tamanho de poro (Liebhard, 1994a) e abastecimento de água do solo (Liebhard et al., 1994), esses fungos são bastante resistentes, podendo sobreviver por períodos de dois a dez anos (Burgess, 1981; Garrett, 1970).

Embora sejam abundantes nos solos, as comunidades de *Fusarium* podem variar em termos de diversidade de espécies, a depender das culturas, das características físico-químicas do solo, das condições climáticas e também pelas atividades humanas (Bateman e Murray, 2001; Steinkellner e Langer, 2004; Summerell et al., 2010).

Além disso, os neossolos por exemplo, que são solos mais rasos e pouco desenvolvidos, podem representar locais de conservação de uma biodiversidade primária onde as comunidades microbianas não foram submetidas a atividades humanas. Alguns estudos investigaram o impacto de práticas culturais e condições climáticas e sazonais na incidência de espécies de *Fusarium* no solo (Bateman e Coskun, 1995; Bateman e Murray, 2001; Steinkellner e Langer, 2004).

2.3.3 O gênero *Trichoderma*

Atualmente, mais de 250 espécies de *Trichoderma* são aceitas. A maioria dessas não é habitante do solo ou possui uma grande distribuição geográfica, mas sim uma distribuição restrita, sendo composta por parasitas de fungos macroscópicos e decompositores de madeiras em florestas tropicais e temperadas (Druzhinina et al., 2011).

Isolados de *Trichoderma* spp. demonstraram capacidade de solubilizar nutrientes a partir de rochas de fosfato, de óxidos de manganês e óxidos de ferro

e também a partir do zinco metálico, em testes *in vitro* (Altomare et al., 1999). O desenvolvimento de nutrientes no solo é bastante complexo e influenciado pelo pH e microflora presentes, o que afeta o acesso desses compostos para serem absorvidos pelas raízes das plantas, fazendo com que o *Trichoderma* spp. seja um microrganismo importante na facilitação do acesso a estes compostos, favorecendo a nutrição e o crescimento da planta (Machado et al., 2012)

Este gênero de fungos é amplamente estudado no mundo todo devido à sua grande versatilidade de atuação no meio ambiente, principalmente no que diz respeito ao controle biológico e em relação ao desenvolvimento de plantas. Além destes campos de pesquisa, o *Trichoderma* também já foi avaliado em relação à sua atuação como biorremediador na remoção de arsênio (As) e chumbo (Pb) do solo (Govarthanan et al., 2019).

Embora tenha dados na literatura sobre a importância desses fungos para os vegetais, não há descrições que abordem como ocorre a interação desses organismos com o mineral presente nas rochas.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

- Avaliar o desenvolvimento de três gêneros fúngicos (*Aspergillus* spp. e *Fusarium* spp. e *Trichoderma* spp.) em meio de cultura contendo pó de rocha derivado de granito e seu efeito no intemperismo da rocha.

3.2 Objetivos específicos

- Avaliar o crescimento dos fungos sob condições de esterilização do pó de rocha (autoclavagem) e sem o processo de esterilização;
- Realizar a caracterização mineralógica da rocha granítica;
- Demonstrar a relação desses fungos com os componentes minerais que constituem o granito;
- Inferir sobre as transformações biogeoquímicas nas rochas em decorrendo de desenvolvimento dos fungos e correlacioná-las com a composição mineralógica e química da rocha.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Coleta e amostragem de rocha

O município de Campos dos Goytacazes (figura 2) pertence à Região Norte do Estado do Rio de Janeiro e localiza-se no ponto de passagem da BR-101 sobre o rio Paraíba do Sul (latitude: 21°45'23"S e Longitude: 41°19'49"W).

A rocha granítica foi coletada no Morro do Itaoca (latitude: 21°47'9.98"S e longitude: 41°27'6.76"W), distrito de Ibitioca, no município de Campos (figura 3). A amostra foi levada ao Laboratório de Solos (LSOL), do Centro de Ciências e Tecnologia Agropecuárias (CCTA), da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). A amostragem foi feita aleatoriamente na face noroeste do morro, onde há grandes superfícies de rocha exposta e pouco alterada (figura 2).

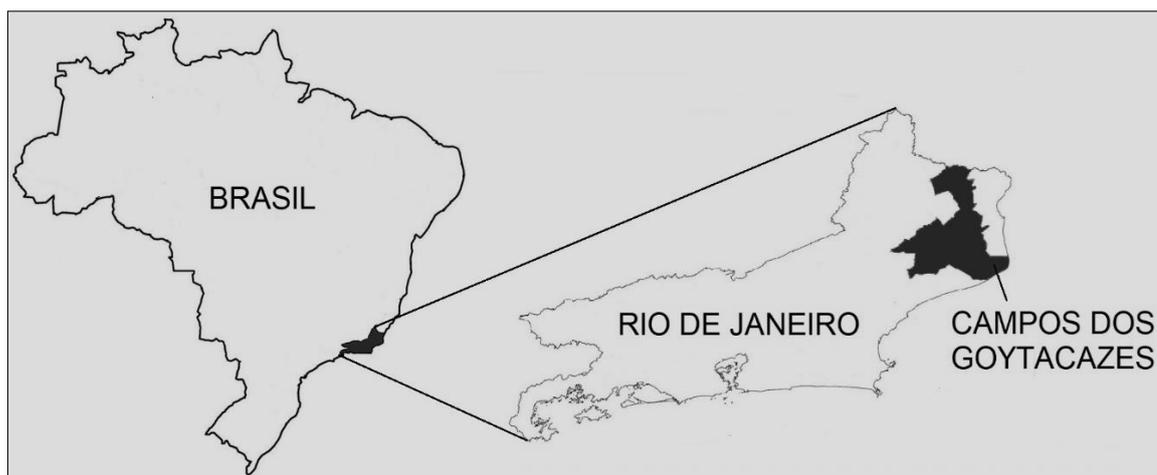


Figura 2. Localização do município de Campos dos Goytacazes, Região Norte do Estado do Rio de Janeiro.



Figura 3. Imagem de satélite (*Google Earth*) da região onde fica localizado o Morro do Itaoca, no município de Campos dos Goytacazes - RJ, com a indicação das coordenadas geográficas do local de coleta das amostras de granito.

4.2 Preparo das amostras de rocha

No Laboratório de Solos, Campus Leonel Brizola – UENF, as amostras de rocha foram fragmentadas em tamanhos menores com a utilização de marreta e martelo. Em seguida, a parte externa das amostras, que ficavam em contato direto com o ambiente, foi limpa e lixada para remover a matéria orgânica e as regiões levemente intemperizadas.

Para obter o pó de rocha, os fragmentos foram quebrados em tamanhos ainda menores e macerados com a utilização de almofariz e pistilo, e peneirados com peneiras de abertura 60 *mesh* (0,250 mm).

A opção por esse tamanho de partícula foi baseada no trabalho de Theodoro et al. (2006), que mostra que materiais mais finos (0,002 e 0,05 mm) disponibilizam mais facilmente seus principais elementos, podendo, em função do intemperismo ou da abrasão, se transformar mais rapidamente, embora os autores não tenham correlacionado esses dados à ação de microrganismos.

4.3 Caracterização mineralógica por Difração de Raios-X

A análise da composição mineralógica das amostras de rochas foi realizada de forma qualitativa por meio da técnica de Difração de Raios-X (DRX), em um difratômetro convencional marca Shimadzu, modelo XRD-6000, utilizando-se radiação monocromática de Cu-K α , variação angular 2 θ 10 – 70° e velocidade de 1°2 θ /min.

4.4 Isolados de fungos, cultivo e inoculação

Para este estudo da degradação do pó de rocha foram utilizados três gêneros de fungos: *Aspergillus* P. Micheli ex Haller, *Fusarium* Link, e *Trichoderma* Pers. Todos os isolados foram gentilmente cedidos pelo Professor Dr. Fábio Lopes Olivares, do Laboratório de Biologia Celular e Tecidual (LBCT), do Centro de Biociências e Biotecnologia (CBB/UENF).

Os fungos foram repicados para placas de Petri contendo meio Batata dextrose ágar (BDA) e incubados em câmara de germinação, tipo BOD, com fotoperíodo 12/12 luz/escuro, a 25°C, até crescerem o suficiente para serem transferidos para o meio de cultura líquido.

Posteriormente, cada fungo foi repicado para o meio de cultura líquido, composto por 10 g de dextrose (C₆H₁₂O₆), 1 g de uréia (NH₂CONH₂), 10 g de pó de rocha e 1 L de água deionizada. O nitrogênio foi fornecido pela ureia e o carbono pela dextrose.

Com o auxílio de uma micropipeta, 30 mL do meio foi colocado em frascos de vidro, previamente lavados em ácido clorídrico e enxaguados em água deionizada. Cada frasco consistiu em uma repetição, fazendo-se 4 repetições/tratamento, num total de 48 frascos.

Os frascos contendo o meio líquido foram autoclavados a 121°C por 20 min. Do total, 16 frascos foram autoclavados já com a adição do pó de rocha: meio + pó de rocha autoclavado (04), meio + *Aspergillus* + pó de rocha autoclavado (04), meio + *Fusarium* + pó de rocha não autoclavado (04) e meio + *Trichoderma* + pó de rocha autoclavado (04). Para os frascos contendo o meio de cultura que foram autoclavados já com o pó de rocha, os fungos foram inoculados após o resfriamento completo destes. Outros 16 frascos também foram autoclavados, no entanto, a adição do pó de rocha e dos fungos ocorreu apenas após seu resfriamento. Foram eles: meio de cultura + pó de rocha não autoclavado (04), meio de cultura + *Aspergillus* + pó de rocha não autoclavado (04), meio de cultura + *Fusarium* + pó de rocha não autoclavado (04), meio de cultura + *Trichoderma* + pó de rocha não autoclavado (04). Outros 04 frascos contendo apenas o meio de cultura também foram autoclavados. Os tratamentos com o pó de rocha autoclavado foram realizados para esterilizar a rocha e também para verificar influência do aumento de temperatura na alteração da composição dos meios.

Discos de 0,3 cm, aproximadamente, das colônias dos fungos foram inoculados sob câmara de fluxo laminar, para evitar contaminações externas. Os frascos foram vedados com parafilme "M" e incubados na BOD por um período de 30 dias. Nos tratamentos com rocha não autoclavada, o pó foi adicionado ao meio no momento da repicagem dos fungos.

Findados os 30 dias, os fungos passaram por um processo de filtração com uma bomba de filtro a vácuo e papel filtro comum (nº 103) para separar os microrganismos e o meio líquido em que se encontravam. Antes da filtração, o papel filtro foi seco em estufa por um período de 24 horas para que fosse retirado o máximo possível de umidade. Após a filtração, os papéis (agora com os fungos), ficaram novamente em estufa, por mais 24 h, para o cálculo do peso seco de cada uma das amostras. Do pó de rocha foram subtraídos os valores dos elementos presentes em solução e o seu resultado subtraído da biomassa dos fungos. O líquido resultante da filtração teve o seu pH medido com um peagômetro de bancada e depois acidificado para pH 3,0 com ácido clorídrico (HCl) a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, para congelamento e posterior análise química.

4.6 Análise química dos meios de cultura por ICP-OES

As análises químicas dos meios de cultura, após o fim do período de 30 dias do experimento, foram efetuadas por meio da espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). As análises foram realizadas no Laboratório de Análises Ambientais, do Departamento de Ciência do Solo, da *ESALQ/USP* (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz/Universidade de São Paulo).

Para a determinação dos elementos foi utilizado um equipamento de ICP-OES modelo iCAP 6300 (Thermo Scientific) com plasma de argônio, visão radial e axial de 175 a 847 nm, sistema de introdução de amostras aquosas com nebulizador concêntrico, detector do tipo CID (Charge Injection Device). Os limites de quantificação para ordem de concentração foram dados em miligramas por litro (mg/L), para os seguintes elementos: Alumínio (Al), Arsênio (As), Bário (Ba), Boro (B), Cádmio (Cd), Cálcio (Ca), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Cromo (Cr), Enxofre (S), Ferro (Fe), Fósforo (P), Potássio (K), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Sódio (Na), Selênio (Se), Silício (Si), Titânio (Ti) e Zinco (Zn). No entanto, nem todos os elementos foram considerados para a realização deste trabalho em virtude da baixa expressão na leitura da amostra. Os elementos químicos utilizados para a realização deste trabalho foram: Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S e Si.

4.7 Análises Estatísticas

Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os principais elementos avaliados, em todos os tratamentos foram: Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S e Si. Além dos elementos, foram avaliados também o pH dos meios de cultura e a biomassa dos microrganismos.

Para análises dos dados, foram realizados os testes do Coeficiente de Correlação de Pearson. Também foi testada a normalidade dos dados através do Teste de Shapiro Wilk ($p > 0,05$). Os dados foram submetidos à ANOVA de um fator (*One Way ANOVA*) para verificar se houve diferença significativa entre os tratamentos testados. Quando os dados dos elementos nos diferentes tratamentos apresentaram normalidade, o teste de Tukey (1949) foi aplicado. Quando não apresentaram normalidade, as médias foram comparadas através do teste não paramétrico de Dunn (1964), como ocorreu nos tratamentos para *Aspergillus* em relação aos seguintes elementos: Ca, Fe, K e P; para *Fusarium* em relação ao Ca, K e Mn; para o *Trichoderma* em relação ao Al e ao Fe. As análises estatísticas e gráficos foram gerados através do software *SigmaPlot* 14.0.

5. RESULTADOS

5.1 Caracterização química e mineral da rocha

A tabela 1 apresenta a composição química do granito estudado (à base de massa, %), indicando a esperada predominância de SiO_2 (~ 65 %), comum a todos os silicatos, seguido de Al_2O_3 (~ 14 %), K_2O (6,4 %), Fe_2O_3 (4,3 %), CaO (3,7 %) e Na_2O (3,33 %). Os demais elementos analisados (P_2O_5 , TiO_2 , MnO , ZrO) apresentam teores próximos e/ou abaixo de 1 %. O teor de água estrutural (determinado por perda ao fogo), foi de 1,12 %.

Tabela 1. Caracterização elementar da amostra de granito coletada no Morro do Itaoca, em Campos dos Goytacazes – RJ

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	ZrO ₂	MnO	Água	Total
	%												
Granito	64,96	13,64	6,40	4,30	3,65	3,33	1,12	0,80	0,45	0,15	0,07	1,12	100,00

Essa caracterização química é consistente com a caracterização mineralógica realizada por DRX, cujo difratograma se encontra na figura 4. As linhas coloridas, geradas automaticamente pelo programa usado na identificação (Match 3.0) revelam a posição dos picos das diversas fases encontradas, assim como a provável fórmula química dos minerais, na legenda à direita superior na figura. As quantidades sugeridas não podem ser consideradas nesse estudo, pois não foi realizado nenhum ajuste matemático para realizar a quantificação do mineral e, portanto, podem ser ignoradas.

Qualitativamente, se observam picos de alta intensidade de quartzo por todo o difratograma, com o mais proeminente e com baixa largura à meia altura em valor próximo a $26,6^\circ 2\theta$ (pico 101, em 0,333 nm). Anortita e anortoclásio foram identificados com base na sequência de picos na região entre 27 e $30^\circ 2\theta$, típica de feldspatos e de minerais da série do plagioclásio. Esses minerais costumam ser abundantes em granitos de coloração clara, como o material em estudo. Um pico basal em $\sim 8,8^\circ 2\theta$ ($\sim 1,01$ nm) foi identificado como o pico basal (001) da biotita, macroscopicamente visível no granito, seguida de picos basais em ~ 18 e $26,6^\circ 2\theta$ (0,5 e 0,34 nm, respectivamente) e por uma série de picos não basais espalhados pelo difratograma. Picos de baixa intensidade correspondentes à apatita também foram observados no padrão de DRX. Um pico menor de caulinita, em $12,2^\circ 2\theta$ ($\sim 0,715$ nm) foi também observado.

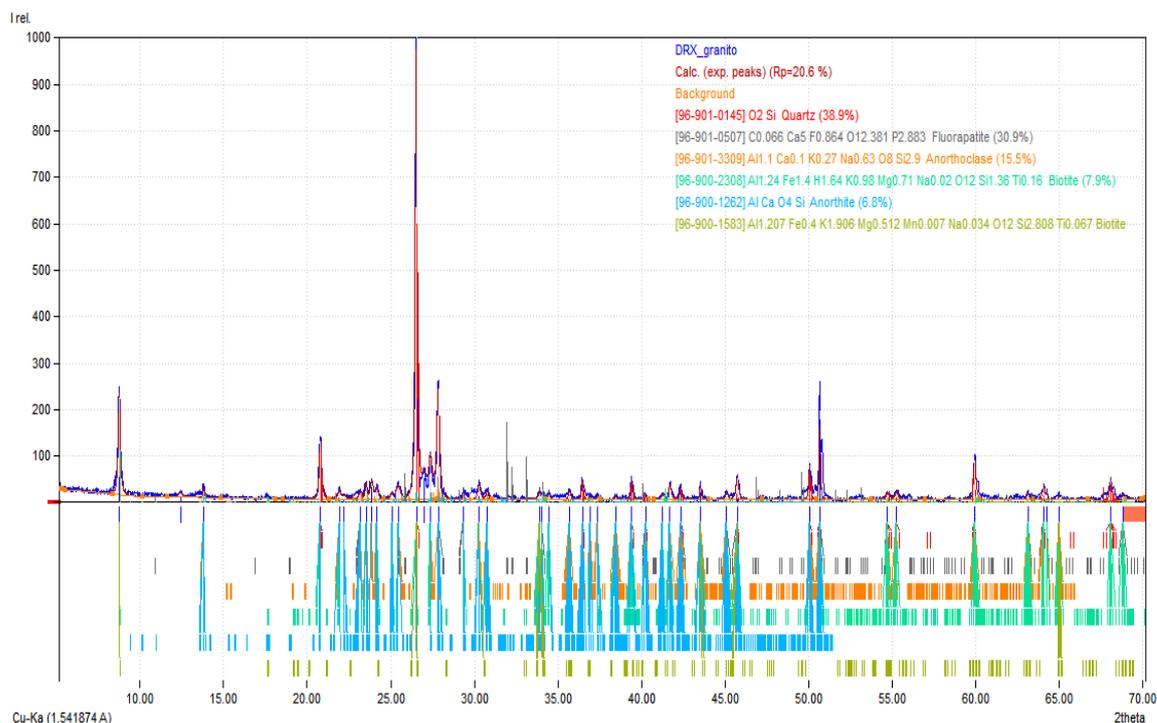


Figura 4. Padrão de DRX do granito estudado. Os minerais identificados se encontram na legenda superior, à direita, e os traços coloridos indicam os picos relacionados a cada fase. Os dados quantitativos, gerados automaticamente pelo Match 3.0, não devem ser considerados neste estudo.

5.2 Medição do pH dos tratamentos e biomassa fúngica

Os resultados dos valores médios de pH e de biomassa dos microrganismos fúngicos em cada um dos tratamentos são apresentados na tabela 2. O controle (meio puro) apresentou pH próximo à neutralidade (6,8). Com a adição do pó de rocha autoclavado e não-autoclavado, o pH sofre pouca alteração, estando também próximos à neutralidade (7,4 e 7,0, respectivamente).

Os tratamentos com a presença dos microrganismos fúngicos tiveram maiores alterações em relação ao pH. Quando na presença de *Aspergillus*, os meios tornaram-se ácidos, apresentando uma acidificação maior no tratamento *Aspergillus* + meio + pó de rocha autoclavado (4,7). Na presença de *Fusarium*, os meios tornaram-se mais alcalinos, apresentando maior alcalinidade no tratamento *Fusarium* + meio + pó de rocha autoclavado (8,0). Para o *Trichoderma*, os meios

também tenderam à alcalinidade, sendo o tratamento mais alcalino o *Trichoderma* + meio + pó de rocha autoclavado (8,3).

Em relação ao crescimento dos microrganismos, é possível observar que o crescimento para *Aspergillus*, o tratamento controle foi o que teve a maior biomassa fúngica (em g) em relação aos outros dois tratamentos (*Aspergillus* + meio + pó autoclavado e *Aspergillus* + meio + pó não-autoclavado). Já para *Fusarium* e *Trichoderma* o maior crescimento foi nos tratamentos em que o pó de rocha não foi autoclavado, seguidos pelos tratamentos controles e tendo o menor crescimento no tratamento em que o pó foi autoclavado.

Tabela 2. Valores das médias de pH, da biomassa das amostras e o desvio padrão (Legenda. PRA: pó de rocha autoclavado; PRNA: pó de rocha não-autoclavado)

Tratamentos	pH	Biomassa dos fungos (g)
Meio Puro	6,8 ± 0,19	¹
PRA	7,4 ± 0,60	¹
PRNA	7,0 ± 0,41	¹
<i>Aspergillus</i> + Meio	5,4 ± 1,06	0,068 ± 0,03
<i>Aspergillus</i> + Meio + PRA	4,7 ± 0,15	0,042 ± 0,02
<i>Aspergillus</i> + Meio + PRNA	6,2 ± 0,50	0,052 ± 0,05
<i>Fusarium</i> + Meio	7,7 ± 0,25	0,066 ± 0,01
<i>Fusarium</i> + Meio + PRA	8,0 ± 0,34	0,051 ± 0,01
<i>Fusarium</i> + Meio + PRNA	7,6 ± 0,08	0,083 ± 0,02
<i>Trichoderma</i> + Meio	8,2 ± 0,53	0,046 ± 0,01
<i>Trichoderma</i> + Meio+ PRA	8,3 ± 0,10	0,015 ± 0,05
<i>Trichoderma</i> + Meio + PRNA	7,7 ± 0,76	0,101 ± 0,04

¹ Controles, sem a presença de fungos no meio.

5.3 Análise química dos meios por ICP-OES

Por meio da técnica de ICP-OES, foi possível quantificar os elementos (alumínio, cálcio, ferro, potássio, magnésio, manganês, sódio, fósforo, enxofre e

silício) e também o pH nos meios de cultura provenientes da alteração da rocha. Os valores médios desses elementos (em mg L^{-1}) estão descritos na tabela 3.

Tabela 3. Valores médios dos elementos em mg L⁻¹ da análise química realizada por meio de ICP-OES e pH das quatro repetições que foram realizadas para cada tratamento.

Tratamentos	pH	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si
Meio Puro	6,8	0,156	0,552	0,082	1,131	0,014	0,001	1,873	0,058	0,145	1,617
PRA	7,4	0,622	10,024	0,367	1,572	0,466	0,058	4,701	0,098	0,231	3,021
PRNA	7,0	0,170	12,090	0,091	1,432	0,515	0,055	6,419	0,018	0,309	6,438
<i>Aspergillus</i> + Meio	5,4	0,077	0,528	0,071	1,085	0,018	0,001	3,882	0,026	0,159	4,228
<i>Aspergillus</i> + Meio + PRA	4,7	1,457	15,548	1,054	1,684	0,957	0,138	4,463	0,239	0,239	3,839
<i>Aspergillus</i> + Meio + PRNA	6,2	0,929	12,429	0,672	1,637	0,731	0,104	4,836	0,275	0,248	2,706
<i>Fusarium</i> + Meio	7,7	0,178	1,450	0,111	0,782	0,087	0,001	4,635	0,127	0,174	3,226
<i>Fusarium</i> + Meio + PRA	8,0	0,421	13,280	0,305	1,873	0,514	0,066	5,057	0,037	0,246	3,343
<i>Fusarium</i> + Meio + PRNA	7,6	0,480	14,694	0,474	1,962	0,679	0,094	5,312	0,163	0,228	2,783
<i>Trichoderma</i> + Meio	8,2	0,145	0,939	0,085	1,064	0,073	0,001	3,987	0,104	0,180	3,299
<i>Trichoderma</i> + Meio + PRA	8,3	0,334	9,769	0,242	1,689	0,412	0,055	5,238	0,041	0,211	6,869
<i>Trichoderma</i> + Meio + PRNA	7,7	0,131	10,047	0,093	1,721	0,453	0,037	5,423	0,021	0,234	6,197

Legenda: PRA: Pó de rocha autoclavado; PRNA: Pó de rocha não-autoclavado;

Elementos químicos: Al (Alumínio), Ca (Cálcio), Fe (Ferro), K (Potássio), Mg (Magnésio), Manganês (Mn), Na (Sódio), P (Fósforo), S (Enxofre) e Si (Silício).

5.4 Análises estatísticas

Nas análises dos dados para verificar a correlação entre a variável massa, o pH e os diferentes elementos encontrados no granito, foi utilizado o coeficiente de correlação produto-momento de Pearson, onde foi possível observar, nos tratamentos com a presença de *Aspergillus* (tabela 4), que a relação entre a variável biomassa do fungo e os elementos foram negativas ou positivas, mas com valores bastantes próximos a zero. Já entre os elementos, o Al apresentou correlação positiva e significativa com Ca, Fe, Mg, Mn, Na, S e Si. O Ca apresentou correlação positiva e significativa com Fe, Mg, Mn, Na, P e S. O Fe teve correlação positiva e significativa com Mg, Mn, P e S. O Mg apresentou correlação positiva com o Mn, Na e S. O Na correlação positiva com o S e o P correlação positiva com o Si. Dentre todos os elementos, o único que não apresentou correlação positiva ou negativa a nível de significância foi o K.

Para os tratamentos com a presença de *Fusarium* (tabela 5), foi possível observar uma correlação positiva (0,639) e significativa ($p < 0,05$) entre a biomassa fúngica e o P. Entre os elementos, Al apresentou correlação positiva e significativa com Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na e S. O Ca teve correlação com o Fe, Mg, Mn e S. O Fe apresentou correlação com o Mg, Mn, Na e P. Já o Mg apresentou correlação com o Mn, o Na e o S. Mn apresentou correlação com o S e o Na apresentou correlação com o P. Já entre P, S e Si, não houve correlação significativa. Dentre esses elementos, apenas o K apresentou correlação significativa com o pH, indicando que essas duas variáveis tendem a aumentar juntas no meio.

Para os tratamentos com a presença do *Trichoderma* (tabela 6), os valores não foram significativos ($p > 0,05$) entre as variáveis biomassa e os elementos analisados. Também não foi significativo para o pH. Entre os elementos, Al apresentou correlação positiva com o Fe. O Ca teve relação positiva e significativa com o K, Mg, Mn e Na. O Fe não apresentou correlação com os demais elementos. O K apresentou correlação positiva e significativa com o Mg, Mn e Na, indicando que esses elementos tendem a aumentar juntos no meio e apresentou correlação negativa e significativa com o P, indicando que uma variável tende a diminuir quando a outra aumenta. O Mg apresentou correlação positiva e significativa com o Mn, Na e S, e negativa com o P. O Mn apresentou

correlação com o Na. Já o Na, apresentou correlação negativa e significativa com o P e este, correlação negativa com o Si. Entre S e Si não houve correlação.

Tabela 4. Coeficiente de correlação produto-momento de Pearson entre a variável massa do *Aspergillus*, o pH e os elementos encontrados no granito

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si	pH
Massa	-0,256	-0,093	-0,250	0,354	-0,148	-0,090	0,296	-0,043	0,131	0,104	0,305
	0,422 ^{ns}	0,772 ^{ns}	0,433 ^{ns}	0,259 ^{ns}	0,646 ^{ns}	0,780 ^{ns}	0,349 ^{ns}	0,895 ^{ns}	0,685 ^{ns}	0,747 ^{ns}	0,334 ^{ns}
Al	1	0,945	0,941	-0,329	0,972	0,947	0,594	0,450	0,763	-0,062	-0,270
		3,6E-06*	4,5E-06*	0,296 ^{ns}	1,3E-07*	2,9E-06*	0,041*	0,142 ^{ns}	0,003*	0,848 ^{ns}	0,395 ^{ns}
Ca		1	0,917	-0,365	0,984	0,996	0,694	0,585	0,784	-0,283	-0,143
			2,7E-05*	0,244 ^{ns}	9,1E-09*	1,097E-11*	0,012*	0,045*	0,002*	0,374 ^{ns}	0,657 ^{ns}
Fe			1	-0,361	0,910	0,934	0,470	0,583	0,600	-0,250	-0,247
				0,249 ^{ns}	3,9E-05*	8,8E-06*	0,123 ^{ns}	0,046*	0,039*	0,432 ^{ns}	0,440 ^{ns}
K				1	-0,347	-0,383	-0,182	-0,199	-0,382	0,301	-0,271
					0,270 ^{ns}	0,219 ^{ns}	0,572 ^{ns}	0,534 ^{ns}	0,221 ^{ns}	0,342 ^{ns}	0,394 ^{ns}
Mg					1	0,981	0,726	0,514	0,826	-0,185	-0,174
						1,9E-08*	0,007*	0,087 ^{ns}	9,3E-04*	0,565 ^{ns}	0,589 ^{ns}
Mn							0,675	0,578	0,775	-0,271	-0,173
							0,016*	0,049*	0,003*	0,395 ^{ns}	0,591 ^{ns}
Na							1	-0,475	0,783	-0,167	0,315
								0,118 ^{ns}	0,003*	0,604 ^{ns}	0,319 ^{ns}
P								1	0,123	-0,615	-0,210
									0,704 ^{ns}	0,033*	0,513 ^{ns}
S									1	0,052	0,008
										0,872 ^{ns}	0,980 ^{ns}
Si										1	-0,222
											0,488 ^{ns}
											1

Legenda: * significativo
^{ns} não houve significância

Tabela 5. Coeficiente de correlação produto-momento de Pearson entre a variável massa do *Fusarium*, o pH e os elementos encontrados no granito

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si	pH
Massa	0,326	-0,033	0,481	-0,181	0,227	-0,251	0,486	0,639	-0,281	-0,076	-0,220
	0,301 ^{ns}	0,918 ^{ns}	0,113 ^{ns}	0,574 ^{ns}	0,479 ^{ns}	0,432 ^{ns}	0,109 ^{ns}	0,025*	0,375 ^{ns}	0,813 ^{ns}	0,492 ^{ns}
Al	1	0,639	0,729	0,593	0,813	0,768	0,749	0,331	0,597	-0,393	0,279
		0,025*	0,007*	0,042*	0,001*	0,004*	0,005*	0,293 ^{ns}	0,040*	0,207 ^{ns}	0,379 ^{ns}
Ca		1	0,791	0,407	0,932	0,923	0,421	-0,145	0,740	0,002	0,205
			0,002*	0,189 ^{ns}	1,05E-05*	1,91E-05*	0,173 ^{ns}	0,654 ^{ns}	0,006*	0,993 ^{ns}	0,522 ^{ns}
Fe			1	0,423	0,907	0,906	0,589	0,151	0,489	-0,213	0,023
				0,170 ^{ns}	4,7E-05*	4,8E-05*	0,043*	0,639*	0,106 ^{ns}	0,507 ^{ns}	0,942 ^{ns}
K				1	0,488	0,382	0,519	-0,142	0,459	-0,520	0,639
					0,107 ^{ns}	0,221 ^{ns}	0,084 ^{ns}	0,660 ^{ns}	0,133 ^{ns}	0,083 ^{ns}	0,025*
Mg					1	0,962	0,623	0,120	0,762	0,234	0,138
						5,9E-07*	0,030*	0,710 ^{ns}	0,004*	0,464 ^{ns}	0,668 ^{ns}
Mn						1	0,493	0,00004	0,690	-0,159	0,023
							0,104 ^{ns}	0,999 ^{ns}	0,013*	0,622 ^{ns}	0,944 ^{ns}
Na							1	0,593	0,396	0,398	0,231
								0,042*	0,202 ^{ns}	0,200 ^{ns}	0,471 ^{ns}
P								1	-0,102	-0,222	-0,314
									0,752 ^{ns}	0,488 ^{ns}	0,321 ^{ns}
S									1	-0,294	-0,275
										0,354 ^{ns}	0,388 ^{ns}
Si										1	-0,166
											0,606 ^{ns}
											1

Legenda: * significativo
^{ns} não houve significância

Tabela 6. Coeficiente de correlação produto-momento de Pearson entre a variável massa do *Trichoderma*, o pH e os elementos encontrados no granito

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si	pH
Massa	-0,199 0,536 ^{ns}	0,267 0,401 ^{ns}	-0,217 0,499 ^{ns}	0,294 0,354 ^{ns}	0,377 0,227 ^{ns}	0,071 0,826 ^{ns}	0,269 0,397 ^{ns}	-0,363 0,246 ^{ns}	0,570 0,052 ^{ns}	0,212 0,509 ^{ns}	-0,351 0,263 ^{ns}
Al	1	0,263 0,409 ^{ns}	0,979 2,8E-08*	0,186 0,563 ^{ns}	0,229 0,474 ^{ns}	0,417 0,178 ^{ns}	-0,041 0,898 ^{ns}	0,325 0,303 ^{ns}	-0,219 0,494 ^{ns}	-0,464 0,129 ^{ns}	0,108 0,738 ^{ns}
Ca		1	0,361 0,249 ^{ns}	0,793 0,002*	0,839 6,45E-04*	0,927 1,5E-05*	0,778 0,003*	-0,532 0,075 ^{ns}	0,559 0,058 ^{ns}	0,224 0,483 ^{ns}	-0,300 0,343 ^{ns}
Fe			1	0,241 0,451 ^{ns}	0,306 0,333 ^{ns}	0,498 0,099 ^{ns}	0,056 0,863 ^{ns}	0,289 0,362 ^{ns}	-0,169 0,599 ^{ns}	-0,378 0,225 ^{ns}	0,107 0,742 ^{ns}
K				1	0,724 0,007*	0,709 0,009*	0,738 0,006*	-0,612 0,034*	0,303 0,338 ^{ns}	0,269 0,397 ^{ns}	-0,012 0,970 ^{ns}
Mg					1	0,654 0,021*	0,887 1,21E-04*	-0,623 0,032*	0,611 0,035*	0,419 0,175 ^{ns}	-0,215 0,502 ^{ns}
Mn						1	0,618 0,032*	-0,337 0,284 ^{ns}	0,298 0,347 ^{ns}	-0,083 0,798 ^{ns}	-0,356 0,256 ^{ns}
Na							1	-0,775 0,003*	0,454 0,138 ^{ns}	0,515 0,086 ^{ns}	-0,280 0,378 ^{ns}
P								1	-0,472 0,121 ^{ns}	-0,637 0,026*	0,190 0,555 ^{ns}
S									1	0,350 0,264 ^{ns}	-0,339 0,281 ^{ns}
Si										1	0,207 0,519 ^{ns}
											1

Legenda: * significativo
^{ns} não houve significância

Na figura 5 estão descritos os valores do teste de média e o desvio padrão (DP) dos elementos, Al, Ca, K, Na e Si, em relação aos diferentes tratamentos estabelecidos para *Aspergillus*. O Fe, Mg, Mg, P e S, estão ilustrados na figura 6. Os elementos foram divididos em dois grupos a fim de melhorar a visualização dos dados nos gráficos.

Para a maioria dos elementos, os tratamentos com pó de rocha autoclavado e com pó de rocha não-autoclavado, na presença de *Aspergillus*, foram os que apresentaram as maiores médias (em mg/L). Para o Na, S e Si, os valores não apresentaram esse mesmo padrão, sendo que as maiores médias registradas foram para o tratamento controle: meio + pó de rocha não autoclavado. No quadro geral, houve diferença estatística significativa entre os tratamentos para todos os elementos, com exceção do K.

Outros dados referentes às análises de variância, como o erro padrão da média, o valor de F e o valor de p em relação a cada um dos elementos avaliados quando na presença de *Aspergillus* podem ser conferidos no apêndice A.

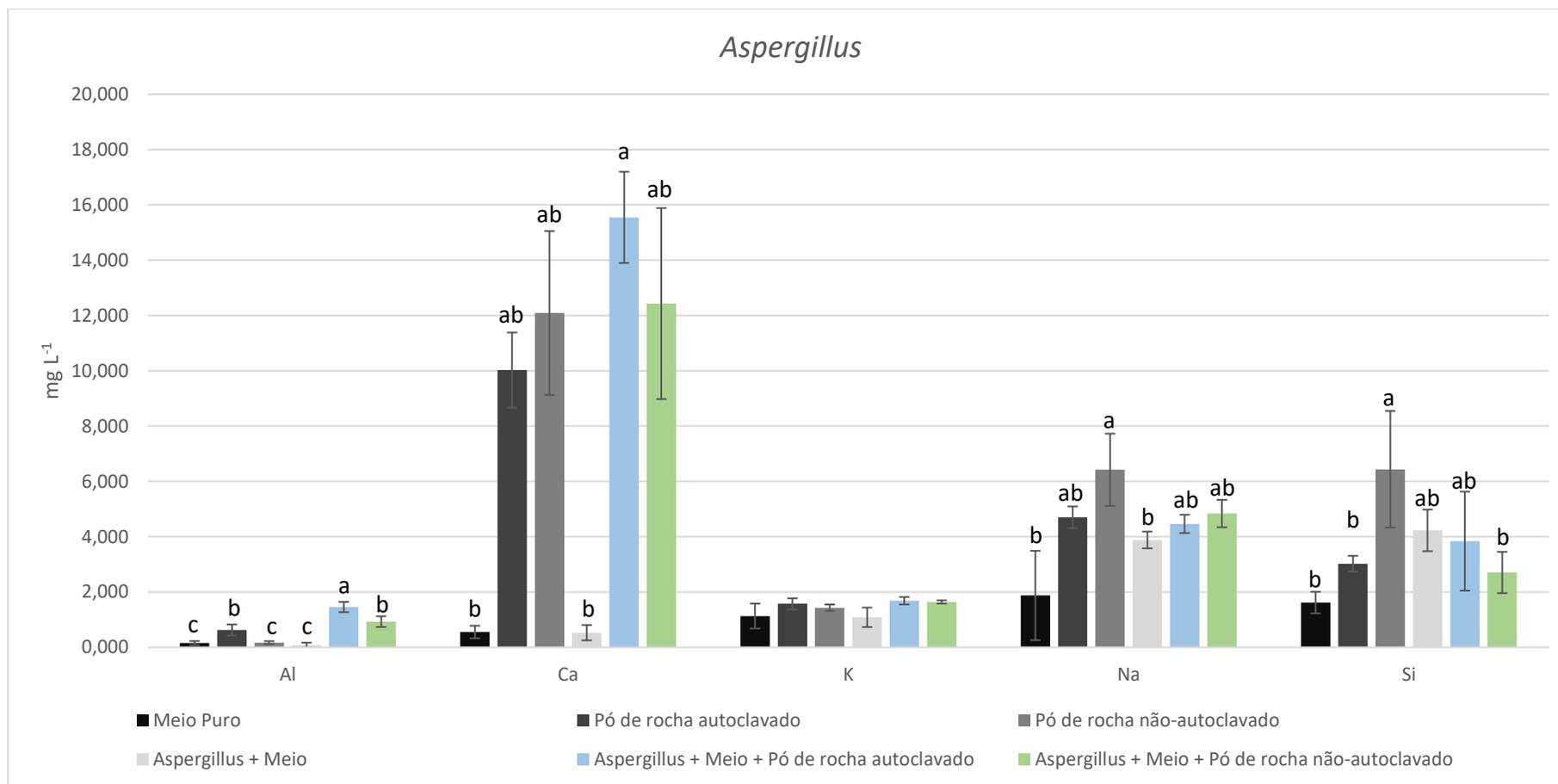


Figura 5. Os dados representam a média \pm DP do teor dos elementos (Al, Ca, K, Na e Si) disponível no meio, em mg L^{-1} , em relação aos tratamentos estabelecidos para *Aspergillus*. Legenda: As letras diferentes acima das colunas indicam que as médias foram significativamente diferentes ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($\alpha=0,05$).

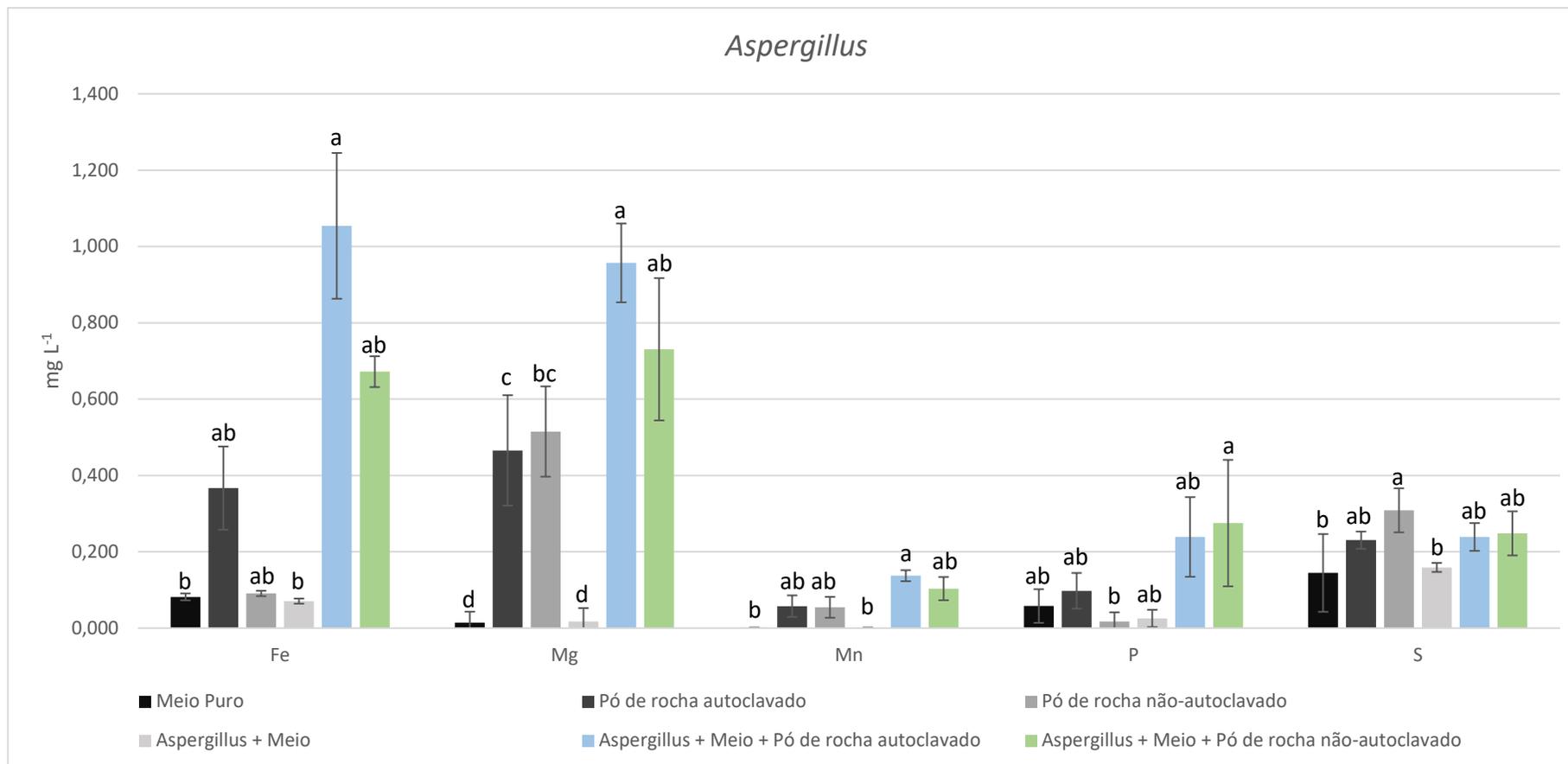


Figura 6. Os dados representam a média \pm DP do teor dos elementos (Fe, Mg, Mn, P e S) disponível no meio, em mg L^{-1} , em relação aos tratamentos estabelecidos para *Aspergillus*. Legenda: As letras diferentes acima das colunas indicam que as médias foram significativamente diferentes ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($\alpha=0,05$).

Na figura 7 estão descritos os valores médios e DP para os elementos Al, Ca, K, Na e Si liberados nos tratamentos relacionados à presença de *Fusarium* e aos tratamentos sem o fungo. Para Al não houve diferença estatística significativa. Para Ca e K, os tratamentos mais expressivos foram: *Fusarium* + meio + pó de rocha autoclavado e *Fusarium* + meio + pó de rocha não autoclavado. Entre esses dois tratamentos, não houve diferença significativa. Para Na e Si, o tratamento com maior teor desses elementos foi meio + pó não-autoclavado.

O Fe, Mg, Mn, P e S estão ilustrados na figura 8. O tratamento *Fusarium* + meio + pó de rocha não-autoclavado apresentou maiores teores de Fe, Mg, Mn e P. Já para o S, assim como ocorreu com os tratamentos contendo *Aspergillus*, as maiores médias registradas foram para o tratamento controle: meio + pó de rocha não-autoclavado.

Outros dados das análises estatísticas realizadas para os testes dos tratamentos de *Fusarium*, como o erro padrão da média, o valor de F e de *p* em relação a cada um dos elementos avaliados, estão presentes no apêndice B.

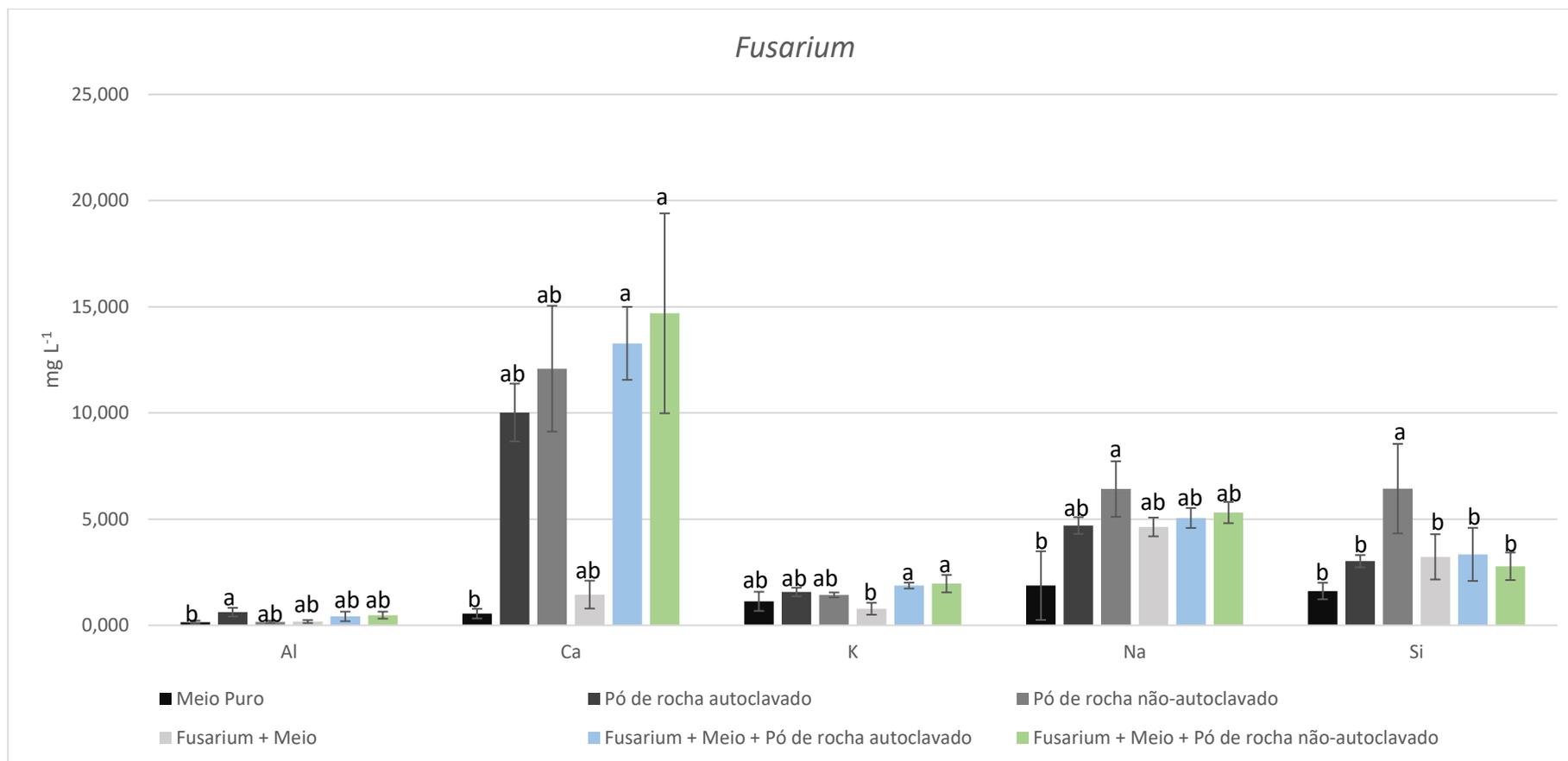


Figura 7. Os dados representam a média \pm DP do teor dos elementos (Al, Ca, K, Na e Si) disponível no meio, em mg L^{-1} , em relação aos tratamentos estabelecidos para *Fusarium*. Legenda: As letras diferentes acima das colunas indicam que as médias foram significativamente diferentes ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($\alpha=0,05$).

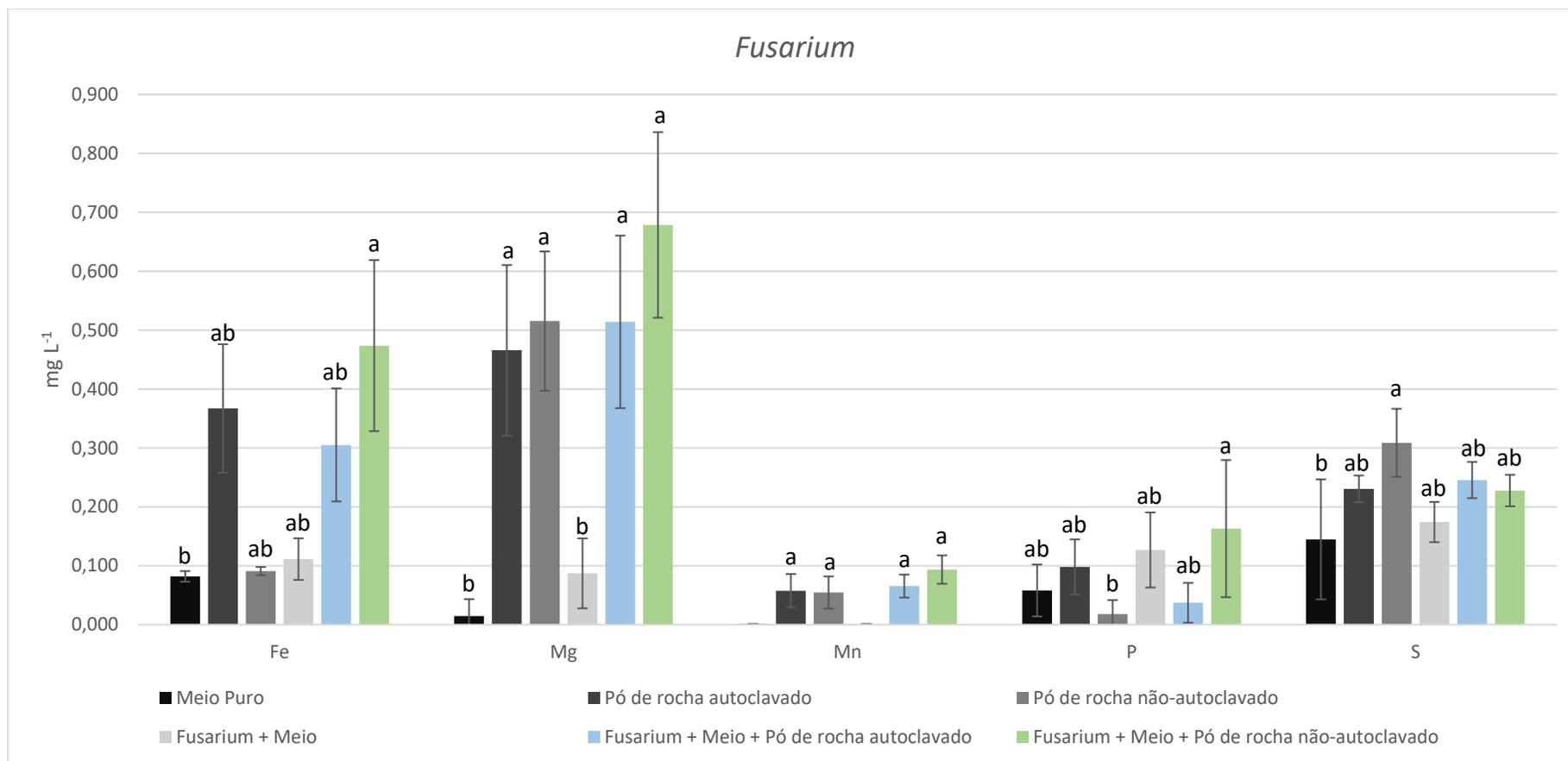


Figura 8. Os dados representam a média \pm DP do teor dos elementos (Fe, Mg, Mn, P e S) disponível no meio, em mg L^{-1} , em relação aos tratamentos estabelecidos para *Fusarium*. Legenda: As letras diferentes acima das colunas indicam que as médias foram significativamente diferentes ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($\alpha=0,05$).

Na figura 9 estão descritos os valores médios e do desvio padrão dos elementos Al, Ca, K, Na e Si em relação aos tratamentos estabelecidos para *Trichoderma*. É possível observar que não houve diferença estatística significativa para o Al nos diferentes tratamentos ($p > 0,05$). Para Ca e Na, os tratamentos que revelaram uma maior quantidade desses elementos no meio, foram pó de rocha não-autoclavado + meio, seguido pelo tratamento *Trichoderma* + meio + pó de rocha não autoclavado. Para K, o tratamento que apresentou maior quantidade foi *Trichoderma* + meio + pó de rocha não-autoclavado e, para o Si, *Trichoderma* + meio + pó de rocha autoclavado.

Os dados de Fe, Mg, Mn, P e S estão na figura 10. Para o Fe, os tratamentos meio + pó de rocha autoclavado e o *Trichoderma* + meio + pó de rocha autoclavado apresentaram maior quantidade do elemento no meio. Para Mg, o tratamento meio + pó de rocha não-autoclavado apresentou maiores teores do elemento no meio.

Para o Mn, foram realizados diferentes testes (Dunn's, Tukey, Dunnett). Diferentes testes foram necessários devido ao fato de que os tratamentos meio puro e meio + *Trichoderma* não apresentaram nenhum valor de Mn, fazendo com que os testes não apresentassem significância, uma vez que só tem como escolher um valor de referência para as comparações. No entanto, o resultado mostra que as diferenças nos valores médios entre os grupos de tratamento são maiores do que seria esperado, havendo uma diferença estatisticamente significativa ($P = 0,011$). Esses testes do Mn estão no apêndice C.

Para o P foi realizado o Teste de Dunnett, onde foi encontrada diferença estatística significativa, com os tratamentos meio + *Trichoderma* e o tratamento meio + pó de rocha autoclavado com maiores teores do elemento. Para S, meio + pó de rocha não-autoclavado apresentou uma maior quantidade do elemento no meio.

Outros dados das análises realizadas, como o erro padrão da média, o valor de F e de p em relação a cada um dos elementos avaliados quando na presença de *Trichoderma*, estão apresentados no apêndice D.

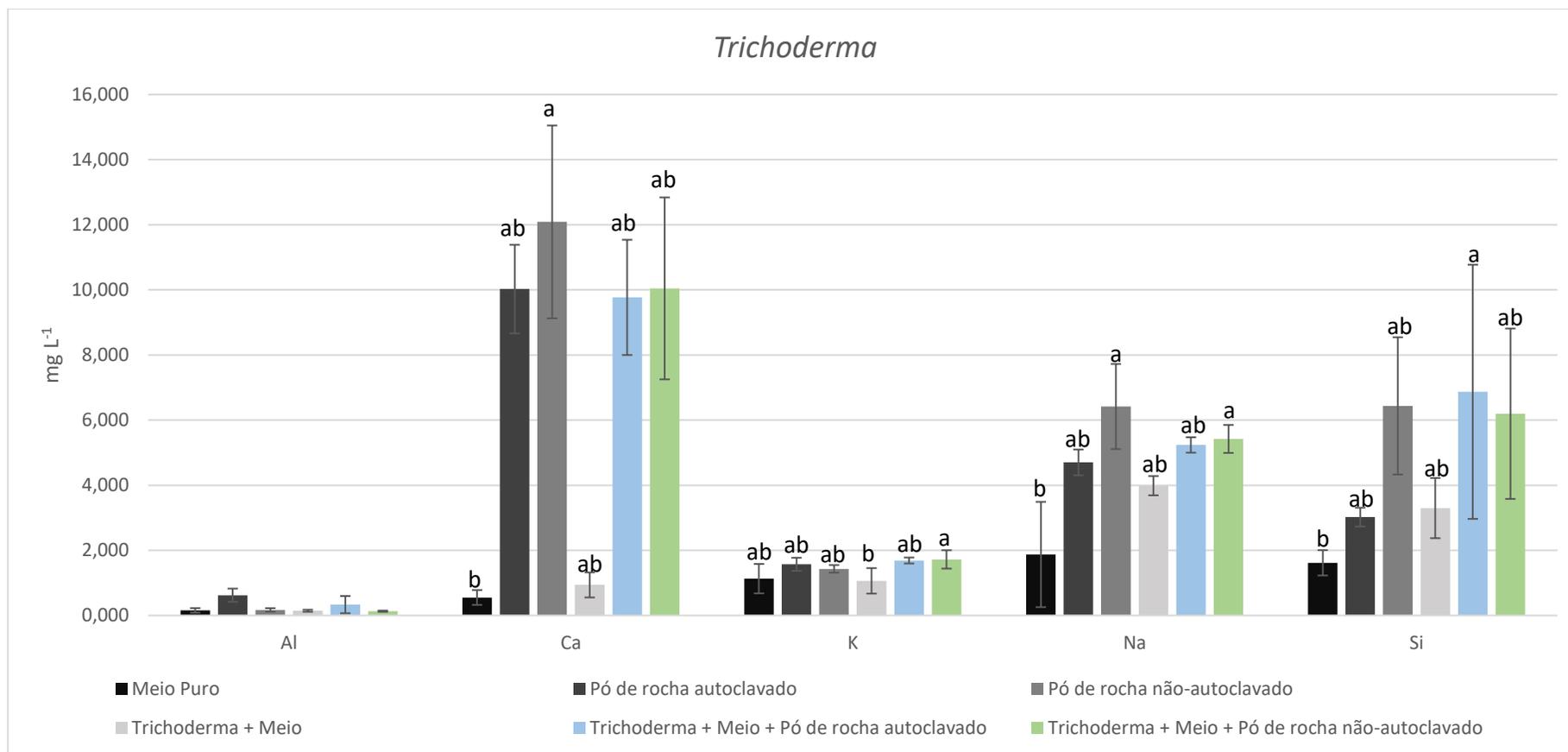


Figura 9. Os dados representam a média \pm DP do teor dos elementos (Al, Ca, K, Na e Si) disponível no meio, em mg L^{-1} , em relação aos tratamentos estabelecidos para *Trichoderma*. Legenda: As letras diferentes acima das colunas indicam que as médias foram significativamente diferentes ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($\alpha=0,05$).

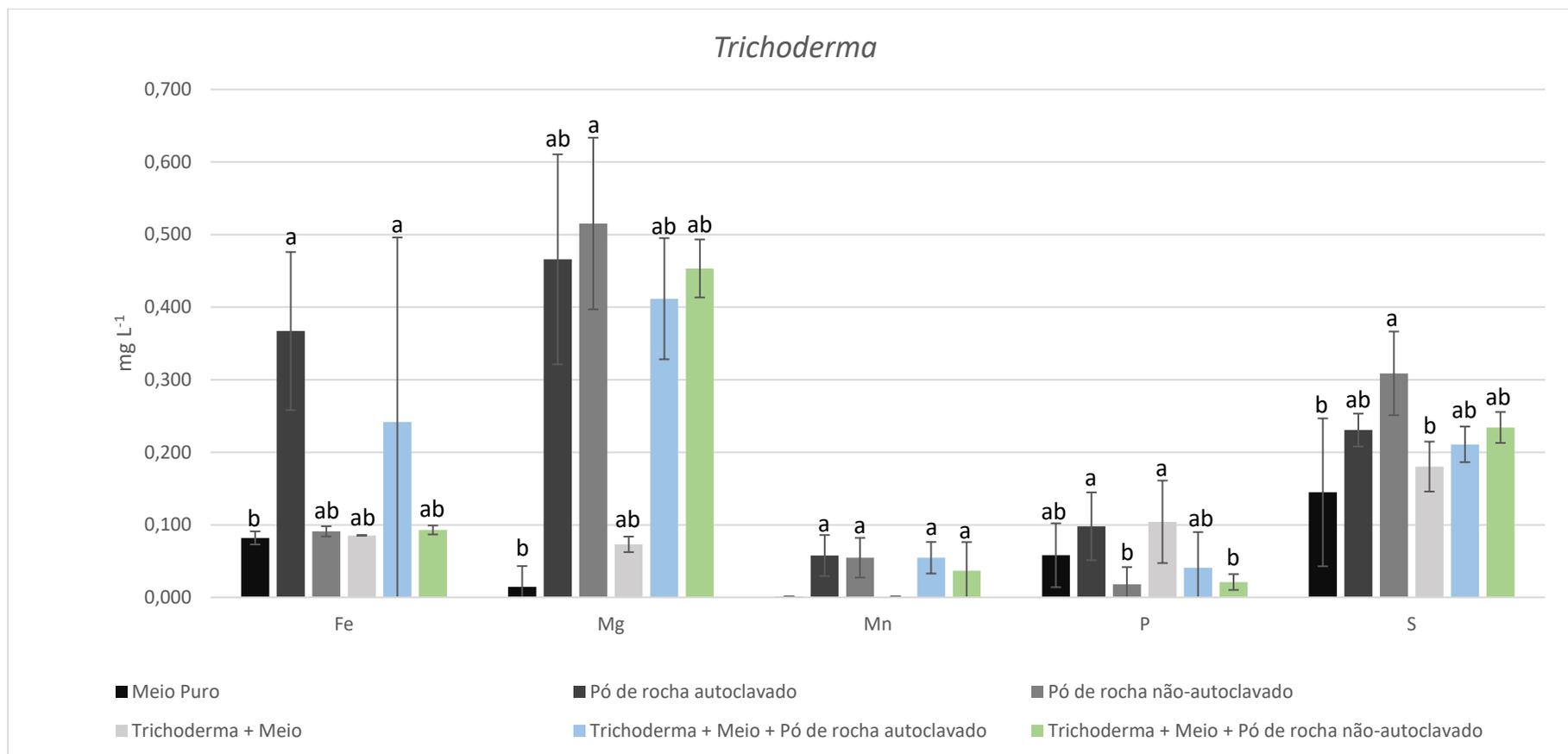


Figura 10. Os dados representam a média \pm DP do teor dos elementos (Fe, Mg, Mn, P e S) disponível no meio, em mg L^{-1} , em relação aos tratamentos estabelecidos para *Trichoderma*. Legenda: As letras diferentes acima das colunas indicam que as médias foram significativamente diferentes ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($\alpha=0,05$).

6. DISCUSSÃO

6.1 Medição do pH dos tratamentos e biomassa fúngica

A variação do pH em uma cultura ocorre de forma natural como resposta às atividades metabólicas dos microrganismos ali presentes. A principal razão para essa variação é a secreção de ácidos orgânicos como, por exemplo, os ácidos cítrico, acético e láctico, o que resulta em uma diminuição no pH, assim como o consumo de sais de amônia (Moraes, 2004). Em contrapartida, a assimilação de ácidos orgânicos, que podem estar presentes em certos meios de cultura, assim como a hidrólise de ureia, podem resultar em uma alcalinização do ambiente. As mudanças de pH também dependem bastante da espécie do microrganismo presente (Moraes, 2004).

A ação de microrganismos pode acarretar o biointemperismo em minerais e rochas, podendo ser por meio de mecanismos bioquímicos e/ou biomecânicos (Gadd, 2010; Gadd, 2017). O intemperismo bioquímico envolve precipitação, complexação, quelação e reações redox mediadas por substâncias como os ácidos orgânicos de baixo peso molecular (LMWOAs), sideróforos, substâncias poliméricas extracelulares e exoenzimas (Hirsch *et al.*, 1995; Kirtzel *et al.*, 2020; Uroz *et al.*, 2009).

Em relação aos valores de pH, o meio de cultura puro estava próximo à neutralidade (pH 6,8). Após a adição do pó de rocha, o pH dos meios apresentou um leve aumento, com pH 7,4 para o pó autoclavado e pH neutro para o tratamento com adição de pó não autoclavado. O controle (meio + *Aspergillus*) apresentou meio mais ácido quando na presença do fungo (pH 5,4). Para o tratamento meio + *Aspergillus* + pó de rocha autoclavado, o meio tornou-se mais ácido na sua presença (pH 4,7). No tratamento meio + *Aspergillus* + pó de rocha não autoclavado, o meio de cultura também foi mais ácido (pH 6,2), em relação ao seu controle (meio + pó de rocha não autoclavado), que apresentou pH neutro.

Para *Aspergillus*, o maior crescimento (biomassa seca fúngica) foi para o tratamento controle (fungo + meio), com uma média de $0,068 \pm 0,03$ g. Para o tratamento com o pó de rocha autoclavado, a massa fúngica registrada foi de $0,042 \pm 0,02$ mg. Já o com pó de rocha não-autoclavado, a biomassa média foi de $0,066 \pm 0,01$ g (tabela 2 e figura 5). Estes resultados corroboram o que foi descrito por Wheeler et al. (1991) que mostrou que espécies deste gênero podem crescer em uma faixa de pH que varia de 2,0 a 11,0, sendo que o pH ótimo para crescimento é mais próximo à neutralidade. No entanto, era esperado que os fungos crescessem mais nos tratamentos que tiveram acréscimo do pó de rocha como fonte de nutrientes.

Para *Fusarium*, o controle (meio + fungo) apresentou-se alcalino (pH 7,7), valor próximo ao que foi constatado para o tratamento meio + fungo + pó de rocha não autoclavado (pH 7,6). Ambos os tratamentos citados anteriormente foram menos alcalinos quando em comparação ao tratamento com o pó autoclavado (pH 8,0). Todos os tratamentos apresentaram meios alcalinos, demonstram que nossos resultados estão de acordo com o que já foi descrito na literatura. Singh (2007), por exemplo, mostra que *F. oxysporum* tem o seu crescimento favorecido em terrenos alcalinos, úmidos e com temperaturas médias de 25 °C.

Frente aos diferentes valores de pH, as peptidases e as lipases, enzimas produzidas por *Fusarium*, demonstram uma maior atividade em meio predominantemente alcalino. A atividade lipolítica é maior em pH 8,5 e a atividade proteolítica é maior em pH variando de 6,0 a 8,5 (Ângelo, 2012), o que também já foi descrito por Gulati et al. (2005) para *F. globulosum*, por Prazeres et al. (2006) e por Rifaat et al. (2010) para *F. oxysporum*, e por Pekkarinen et al. (2002) para *F. culmorum*.

Em relação ao crescimento dos fungos deste gênero (tabela 2 e figura 7), é possível observar no tratamento com pó de rocha não autoclavado, que o *Fusarium* cresceu mais ($0,083 \pm 0,02$ g). Já no tratamento com o pó autoclavado, o crescimento foi de $0,051 \pm 0,01$ g e, no controle, de $0,066 \pm 0,01$ mg. Embora apresente um crescimento tímido, os fungos cresceram em uma faixa de pH próxima ao que foi descrito no trabalho desenvolvido por Santos et al. (2014), em que eles mostraram um crescimento ótimo de *Fusarium* a pH 8,0.

Para *Aspergillus* e *Fusarium*, o crescimento foi maior para os tratamentos meio + fungo, em relação aos tratamentos que continham o pó de rocha (autoclavado e não autoclavado), o que leva a considerar que alguns dos elementos presentes na rocha poderiam estar inibindo o crescimento desses microrganismos. Uma outra consideração a ser levantada é o fato de que nos tratamentos meio + fungo + pó de rocha não autoclavado os microrganismos apresentaram maior biomassa do que os tratamentos em que o pó foi autoclavado, o que mostra a possibilidade de haver outros microrganismos no meio, o que seria possível investigar com a tentativa de isolamento de fungos locais.

Em relação ao gênero *Trichoderma*, mesmo sendo encontrados dados na literatura citando que este gênero cresce em ampla faixa de pH, o mais comum de se encontrar são trabalhos mostrando a ação desses microrganismos quando em meios ácidos. Em trabalhos realizados por Steyaert et al. (2010), por exemplo, com diferentes espécies de *Trichoderma*, os autores observam que o pH do meio de cultura possui limite de acidificação em torno de 4,0. Raimbault (1998) também demonstrou que fungos deste gênero apresentam uma razoável estabilidade entre os valores de 4,0 e 5,0. Esses resultados se diferem do que foi encontrado nos nossos tratamentos, em que todos os meios foram alcalinos.

O gênero *Trichoderma* apresentou a maior biomassa ($0,101 \pm 0,04$ g) no tratamento com o pó de rocha não-autoclavado, enquanto para pó de rocha autoclavado, o fungo pouco cresceu ($0,015 \pm 0,05$ g). No controle, o valor foi de $0,046 \pm 0,01$ g. Esses valores tão divergentes entre os tratamentos não eram esperados e, tampouco, se esperava um crescimento tão ínfimo para o pó de rocha autoclavado. Aqui foram realizados os mesmos procedimentos experimentais descritos para *Aspergillus* e *Fusarium*. Uma hipótese a ser levada em consideração é a de que outra espécie de fungo poderia estar presente no

meio, mesmo não apresentando crescimento visível a olho nu, mas que poderia estar liberando componentes que inibem o crescimento de *Trichoderma*.

6.2 Liberação de elementos no meio e alteração mineral nos experimentos

Cada um dos elementos foi analisado individualmente em relação ao comportamento que os fungos exercem na presença deles. O Si é o elemento mais abundante na rocha (Tabela 1), uma vez que os principais minerais que compõem o granito e identificados no DRX (Figura 4) são silicatos, como o quartzo, plagioclásios e biotita. Esse elemento é liberado em função da alteração bioquímica induzida por microrganismos (Adeyemi e Gadd, 2005; Pinzari et al., 2022). De forma geral, os teores liberados no meio pela ação fúngica ou pela ação do próprio meio, verificada nos tratamentos sem fungos, foi relativamente abundante quando comparados aos demais elementos. Apenas o Ca apresentou teores mais elevados que o Si e o Na para alguns tratamentos. Já o efeito dos fungos na liberação dos elementos foi bastante diferenciado em relação a cada gênero.

Para *Aspergillus*, o tratamento com meio + pó de rocha não autoclavado foi estatisticamente igual ao tratamento *Aspergillus* + meio e *Aspergillus* + meio + pó de rocha autoclavado. Isso indica que, no tempo analisado, a alteração provocada pela ação do meio não se diferenciou da bioquímica, induzida pela presença dos fungos. Além disso, pode ser que microrganismos nativos da rocha tenham sido mais eficientes na alteração dos silicatos, já que o pó não passou por autoclavagem. A ausência de relação entre a biomassa de *Aspergillus* (Tabela 4) e os teores liberados de Si sugere que o elemento não foi absorvido pelos microrganismos, embora os teores menores nos tratamentos com o fungo possam indicar que o elemento possa ter se precipitado, uma vez que organismos são capazes de induzir a formação de géis precursores da formação de silicatos (Fiore et al., 2011).

Para o gênero *Fusarium*, a tendência de maior liberação de Si no tratamento com meio + pó de rocha não-autoclavado indica uma tendência parecida, embora esse tratamento seja estatisticamente superior aos demais, que se assemelham entre si. Nesse caso, a combinação entre a alteração provocada pelo meio e pela possível ação de microrganismos nativos foi mais eficiente para induzir a dissolução de tetraedros de Si, comuns a todos os silicatos. Para os tratamentos com *Trichoderma*, os tratamentos com fungos (mais o pó não-autoclavado e autoclavado) e o tratamento com meio + pó de rocha autoclavado não diferiram estatisticamente. O único tratamento estatisticamente distinto e inferior aos demais foi o meio puro. Sugere-se, portanto, que não houve distinção do efeito dos fungos em relação à alteração provocada pela ação do meio e de possíveis organismos nativos presentes na rocha.

Na tabela 3, é possível encontrar a descrição dos valores de Al frente à ação dos três gêneros de fungos e na figura 5, especificamente para o *Aspergillus*. Para os controles, o meio puro e o meio contendo apenas o pó de rocha não autoclavado apresentaram valores próximos da quantidade de Al no meio (0,156 e 0,170 mg L⁻¹, respectivamente), enquanto no controle com o pó de rocha autoclavado, houve maior quantidade de Al (0,622 mg L⁻¹).

Quando comparamos o *Aspergillus* em relação aos controles, o tratamento fungo + meio + pó de rocha autoclavado aumentou em relação ao tratamento controle meio + pó de rocha autoclavado, passando de 0,622 mg L⁻¹ para 1,457 mg L⁻¹, sendo diferentes estatisticamente. O mesmo ocorreu para o tratamento fungo + meio + pó de rocha não autoclavado, que apresentou o valor de 0,929 mg L⁻¹, sendo estatisticamente diferente do seu controle meio + pó de rocha não autoclavado em que o valor de Al no meio foi de 0,170 mg L⁻¹. Esses valores sugerem que o fungo em questão pode ter solubilizado esse elemento, uma vez que os tratamentos em que o fungo estava presente apresentaram valores superiores de Al no meio em relação aos seus controles.

O elemento não apresenta correlação significativa (positiva ou negativa) com a biomassa do *Aspergillus* e nem com o pH. No entanto, há correlação positiva e significativa com outros elementos, como por exemplo, o Ca, o Fe, o Mg, o Mn, o Na e o S, o que significa que esses elementos aumentam juntos no meio, na presença do fungo.

O Al é um elemento estrutural em muitos silicatos, presente em sítios octaédrais (Klein e Dutrow, 2012) e, portanto, é natural que a alteração de silicatos induzida por espécies de fungos solubilize esse elemento (Pinzari et al., 2009, 2022). De acordo com a identificação mineralógica por DRX (Figura 4) e a composição química da rocha (Tabela 1), há minerais que possuem teores consideráveis de Al em suas estruturas cristalinas, como o anortoclásio, a anortita e a biotita. Há ainda, a possibilidade do elemento se originar da dissolução de minerais acessórios do granito, que podem apresentar teores elevados do elemento.

Para o *Fusarium* (tabela 3 e figura 7), o controle meio puro e o controle meio + fungo apresentaram valores próximos de Al no meio ($0,156 \text{ mg L}^{-1}$ e $0,178 \text{ mg L}^{-1}$), indicando que, para estes tratamentos, a presença do elemento foi baixa. Para o tratamento fungo + meio + pó de rocha autoclavado, o teor de Al no meio foi de $0,421 \text{ mg L}^{-1}$, sendo menor do que o seu controle (meio + pó de rocha autoclavado), que apresentou valor de $0,622 \text{ mg L}^{-1}$, não sendo diferentes estatisticamente. Para o tratamento fungo + meio + pó de rocha não autoclavado aconteceu o inverso, apresentando $0,480 \text{ mg L}^{-1}$, sendo maior que o seu controle meio + pó de rocha não autoclavado ($0,170 \text{ mg L}^{-1}$), não havendo diferenças estatísticas entre os tratamentos.

O Al para o *Fusarium*, assim como ocorreu para *Aspergillus*, se correlacionou positivamente com os elementos Ca, Fe, Mg, Mn, Na e S, indicando que o teor desses elementos aumenta juntos no meio. Não houve correlação com a biomassa do fungo, indicando que o elemento não influencia na biomassa e vice-versa, bem como não se correlacionou com o pH do meio.

Para o *Trichoderma* (tabela 3 e figura 9), todos os tratamentos apresentaram valores inferiores para o Al em relação aos controles. Um estudo publicado por Santos (2017) indica que a diminuição do Al ocorre porque espécies desse fungo apresentam significativa resistência a este elemento, sendo capazes de tolerá-lo e até mesmo absorvê-lo. No entanto, o mesmo não pode ser afirmado no nosso trabalho pelo fato de que, embora a relação entre as variáveis massa e Al seja negativa, o seu valor não é significativo para que tal afirmação seja feita.

Diferentemente dos outros dois fungos, a correlação entre o Al e os demais elementos só foi significativa com o Fe, indicando que, neste caso, Al e Fe aumentam juntos no meio, o que não ocorre com nenhum outro elemento, na

presença do *Trichoderma*. Também não se correlacionou com a biomassa do fungo e com o pH do meio.

O Ca foi o elemento com maiores concentrações no meio após a realização do experimento (valores máximos na ordem de 15 mg L^{-1}), fato associado à elevada presença do elemento na composição dos minerais comuns da rocha (Tabela 1), sobretudo o anortoclásio e anortita (Figura 4), que são altamente susceptíveis à alteração. Segundo a série de Goldich (Klein e Dutrow, 2012), esses minerais se alteram facilmente nas condições de superfície, o que explica os elevados teores na solução. Em granitos, fungos são capazes de alterar essas estruturas minerais, devido à ação bioquímica e biomecânica (Gleeson et al., 2005; Smits, 2009). Entretanto, não se pode distinguir o efeito da autoclavagem, e mesmo da possível presença de outros organismos nativos da rocha (tratamentos com rocha sem autoclavagem), da atuação direta dos fungos nessas estruturas minerais, já que não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos controle sem a presença dos fungos e com a presença dos fungos. Para os três gêneros testados, o único tratamento que se apresentou estatisticamente inferior aos demais foi o meio puro sem a presença dos fungos, corroborando o fato de não haver distinção entre os tratamentos contendo rocha sem fungos e os tratamentos contendo populações fúngicas.

O Ca é um elemento importante para os processos biogeoquímicos resultantes das interações dos microrganismos com o solo. Ele tem maior disponibilidade onde o pH é maior que 5,5 (Moreira; Siqueira, 2009). Embora no nosso trabalho, *Aspergillus* tenha apresentado pH menor que 5,5, isso não parece ter interferido na disponibilidade do elemento.

No teste do Coeficiente de Correlação de Pearson, quando na presença de *Aspergillus*, o Ca se correlacionou positivamente de forma significativa com o Fe, Mg, Mn, Na, P e S, e não teve relação com a biomassa ou o pH. Na presença de *Fusarium*, o elemento teve correlação positiva e significativa com o Fe, Mg, Mn e S e também não se correlacionou com a biomassa e o pH. Para o *Trichoderma*, o Ca se correlacionou positiva e significativamente com o K, Mg, Mn e Na e, assim como ocorreu nos outros dois fungos, não se correlacionou com a biomassa e o pH. O Mg e o K apresentam teores de disponibilidade no meio parecidos com o Ca (Moreira; Siqueira, 2009), portanto, era esperado encontrar correlações positivas entre esses elementos para os três microrganismos, o que aconteceu

com o Mg. No entanto, o K só teve correlação positiva com o Ca na presença do *Trichoderma*.

O Fe, considerando a composição mineral e química do granito (Tabela 1, Figura 4), é elemento estrutural da biotita, principal mineral portador do elemento. O elemento está presente na forma de Fe^{2+} nas lâminas trioctedrais do mineral (Guggenheim et al., 2006) e pode ser rapidamente oxidado à medida que o mineral se altera em condições de superfície (Gilkes et al., 1972). De acordo com a série de Goldich (Klein e Dutrow, 2012) e com o trabalho experimental de Jackson (1968), o mineral se altera facilmente para outros filossilicatos (Dong et al., 1998) à medida que o intemperismo progride, devido à redução de carga na camada, mecanismo diretamente envolvido com a oxidação do Fe^{2+} para Fe^{3+} (Gilkes et al., 1972; Zavarzina et al., 2016).

O maior teor de Fe liberado após o experimento foi observado para o tratamento com *Aspergillus* + meio + pó de rocha autoclavado, atingindo valores superiores a 1 mg L^{-1} . Entretanto, esse valor não se diferiu estatisticamente do tratamento controle (fungo + pó de rocha autoclavado). O tratamento *Aspergillus* + meio + pó de rocha não autoclavado apresentou teor de Fe de $0,672 \text{ mg L}^{-1}$ e também não se diferiu estatisticamente do controle (meio + pó de rocha não autoclavado), que apresentou teor de $0,091 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe no meio. Para ambos os tratamentos, os valores indicam que o próprio processo de autoclavagem e a presença de organismos nativos em conjunto com o *Aspergillus*, no meio de cultura, apresenta a mesma eficiência na solubilização do elemento.

Para o *Fusarium*, a mesma tendência foi observada, onde o tratamento fungo + meio + pó de rocha autoclavado apresentou teor de Fe de $0,305 \text{ mg L}^{-1}$, valor menor que o seu controle meio + pó de rocha autoclavado ($0,367 \text{ mg L}^{-1}$), o que não representa diferença estatística significativa entre eles. O tratamento fungo + meio + pó de rocha não autoclavado apresentou o valor de $0,474 \text{ mg L}^{-1}$ de teor de Fe, enquanto o seu controle (meio + pó de rocha não autoclavado) apresentou $0,091 \text{ mg L}^{-1}$, não sendo diferentes estatisticamente. Entretanto, o valor máximo liberado foi inferior ao *Aspergillus*, sugerindo maior eficiência na dissolução da biotita e outros minerais portadores de Fe para este gênero. Em relação ao *Trichoderma*, a ausência de diferenças estatísticas entre os meios contendo o fungo e a autoclavagem indicam a mesma tendência já comentada. Os tratamentos contendo o fungo solubilizaram valores quase três vezes

inferiores ao maior valor observado dentre todos os experimentos (*Aspergillus* + meio + pó de rocha autoclavado), podendo-se levantar as hipóteses de que existe baixa eficiência deste gênero para solubilizar o elemento ou de que ele solubilize e absorva os cátions.

O Fe é um elemento que tem maior disponibilidades onde o pH é ácido, o que poderia ser prejudicial para o crescimento dos fungos que apresentam o meio alcalino, como é o caso do *Fusarium* e do *Trichoderma*, no entanto, não ocorreu. Mesmo o Fe apresentando correlação positiva e significativa com outros elementos que apresentam o mesmo grau de disponibilidade (Moreira e Siqueira, 2009), como o Al para os três gêneros, e o Mn para *Aspergillus* e *Fusarium*, a inibição no crescimento não foi constatada. Era esperado que o Fe apresentasse correlação positiva e significativa com o Mn também na presença do *Trichoderma*, mas não ocorreu.

Nos granitos, o K é elemento estrutural importante em feldspatos e em minerais do grupo da mica (incluindo a biotita), o que justifica o teor alto observado na composição química da rocha, maior que Ca, Na e Fe, por exemplo (Tabela 1). No material analisado, pode-se atribuir sua presença ao anortoclásio e à biotita, sendo nesta última associada à entrecamada deste mineral (Guggenheim et al., 2006). Os teores liberados no meio, entretanto, são bem inferiores a outros elementos estruturais importantes, como Ca, Na e Si, oscilando em valores próximos a 2,0 mg L⁻¹. Este fato pode estar associado à maior resistência ao intemperismo dos feldspatos que contêm K estrutural, como o anortoclásio, em comparação à série albita-anortita. Mesmo a biotita, cuja alteração pode ser acelerada pela oxidação do Fe octaedral, é mais resistente à alteração do que os minerais da série albita-anortita (Klein e Dutrow, 2012).

Com relação ao papel dos fungos na alteração dos minerais portadores de K no meio, os resultados indicam, de modo geral, que qualquer processo bioquímico induzido pelos fungos não pode ser distinguido da própria alteração resultante do contato com o meio de cultura. Essa ideia é corroborada pela ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos contendo fungos (incluindo tratamentos com e sem autoclavagem) e os tratamentos controle. Esses resultados são diferentes dos encontrados por Lian et al. (2008), que observaram taxas elevadas de liberação de K em após o contato de *Aspergillus fumigatus* com pó de folhelho rico em minerais portadores de K (feldspatos e illita),

em meio de cultura líquido. Neste experimento, alguns tratamentos chegaram a liberar mais de 100 mg L⁻¹ do elemento. Pinzari et al. (2022) também encontraram evidências de extração de K de flogopita, muscovita e vermiculita potássica em experimentos envolvendo minerais e espécies fúngicas.

O K também é um elemento importante para os microrganismos do solo, como por exemplo para o metabolismo e a divisão celular. É um elemento que tem maior disponibilidade em meios mais alcalinos (Moreira; Siqueira, 2009). Nos testes de correlação, o K apresentou valores positivos e significativos com o Al, quando na presença de *Aspergillus*, e relação positiva significativa com o Ca, Mg, Mn, Na e P, quando na presença do *Trichoderma*. Nos dois casos, não era esperado uma correlação positiva com o Al (*Aspergillus*) e Mn (*Trichoderma*), uma vez que esses elementos têm maior disponibilidade em ambientes mais ácidos (Moreira; Siqueira, 2009). Com o *Fusarium*, a correlação foi positiva e significativa apenas com o pH, indicando que à medida que ocorre aumento do pH (mais alcalino), há um aumento também no teor de K no meio. As poucas correlações apresentadas com o K também se devem ao fato de que este elemento ter maior resistência ao intemperismo dos feldspatos que o contêm em sua forma estrutural, como citado no parágrafo anterior.

O Mg, assim como o Fe, é majoritariamente encontrado na estrutura da biotita, especificamente nos sítios trioctaedrais do mineral (Guggenheim et al., 2006). Fungos podem acessar a estrutura de filossilicatos ricos em Mg, especialmente de espécies trioctaedrais (Glowa et al., 2003; Pinzari et al., 2009; Li et al., 2019). Os máximos valores liberados nos meios, após o experimento, oscilaram entre aproximadamente 0,5 e 1,0 mg L⁻¹, sendo similares aos teores de Fe (Figuras 6, 8 e 10). O tratamento que mais se destacou, em termos de valores absolutos e estatisticamente, em comparação aos controles, foi o *Aspergillus* + meio + pó de rocha autoclavado. Nos demais conjuntos experimentais, os tratamentos com fungos não se diferenciaram dos controles. No caso do *Fusarium*, o tratamento contendo o fungo + rocha não-autoclavada foi estatisticamente igual ao tratamento com fungo + pó autoclavado e em relação aos controles, sem fungo, o que mostra que populações microbianas nativas do próprio granito podem ter sido mais eficientes na liberação do elemento. Para *Trichoderma*, os controles sem fungo apresentaram-se numericamente maiores e

estatisticamente similares aos tratamentos contendo o fungo, indicando pouca eficiência do gênero na alteração da biotita.

Nos testes de correlação de Pearson, o Mg apresentou relação positiva e significativa com Mn, Na e S, na presença de *Aspergillus* e *Fusarium*. Quando na presença de *Trichoderma*, a correlação foi positiva e significativa também com o Mn, Na e S e foi negativa e significativa quando correlacionado ao P, indicando que, quando um dos dois elementos aumenta no meio, o outro diminui, o que faz sentido uma vez que o Mg tem maior disponibilidade em meios próximos à neutralidade, enquanto que o P, tem disponibilidade maior (Moreira; Siqueira, 2009).

Com relação ao Mn, observou-se que os tratamentos que não continham pó de rocha liberaram valores muito pequenos, quase nulos, indicando que praticamente todo o elemento observado nos tratamentos contendo o pó, advém de minerais da própria rocha. Os baixos teores liberados sugerem que este elemento deve estar presente em minerais acessórios que não foram identificados pelo DRX (Figura 4). Para os tratamentos contendo fungos e pó de rocha, não houve diferença significativa no tempo dos experimentos, entre a atuação dos fungos e a liberação causada pelo contato com o meio de cultura, indicando que a solubilização é pouco afetada pela presença dos fungos e até mesmo pelo processo de autoclavagem ou ainda que o elemento pode ter sido tóxico para os microrganismos.

O Mn, nos testes de correlação de Pearson, apresentou correlação positiva e significativa com o Na, P e S, quando na presença de *Aspergillus*, com o S quando na presença de *Fusarium* e com o Na quando na presença de *Trichoderma*. Este elemento também é importante para a nutrição dos microrganismos, no entanto, a presença de elevado teor de Mn, pode levar a toxicidade do meio, afetando o seu crescimento, embora isso não tenha sido constatado no nosso trabalho.

O Na é um elemento estrutural importante no granito estudado (Tabela 1), estando presente nos minerais da série anortita-albita (Klein e Dutrow, 2012). Entretanto, mesmo que a albita não tenha sido identificada no DRX é muito comum que o elemento substitua parte do Ca nos sítios dodecaédricos dos plagioclásios cálcicos identificados na rocha (anortita e anortoclásio), o que explica sua abundância relativa no material (Tabela 1). O biointemperismo de

granitos é capaz de liberar os elementos estruturais dos plagioclásios, como o Na (Gleeson et al., 2005). Nas condições experimentais estudadas, este elemento foi liberado em teores relativamente altos, próximos ao Si, com concentrações máximas próximas a 6-7 mg L⁻¹. Numericamente, em todos os conjuntos experimentais, os maiores teores liberados foram observados para o tratamento meio puro + pó de rocha. Entretanto, os valores associados a este tratamento não diferiram estatisticamente dos tratamentos contendo fungos. Essa pequena diferença numérica entre o tratamento sem fungo e com fungos sugere que parte do elemento pode estar sendo absorvido pelas células fúngicas ou que parte do Na esteja se precipitando como algum mineral ou substância amorfa no meio contendo fungos, uma vez que exsudatos liberados por microrganismos podem induzir a precipitação de minerais (Fiore et al., 2011).

Bioquimicamente, o Na pode estar associado à divisão celular e nutrição dos microrganismos (Moreira, Siqueira, 2009). Nos testes de correlação, o Na apresentou correlação positiva e significativa com o S, quando na presença de *Aspergillus*, e com o P quando na presença de *Fusarium*. Diferentemente dos outros dois fungos, quando na presença de *Trichoderma*, o Na apresentou correlação negativa e significativa com o P.

O P é um elemento comum na apatita, mineral primário encontrado no granito estudado (Figura 4). O biointemperismo de apatita induzido pela ação de fungos é reportado em condições experimentais similares à usada neste trabalho, inclusive devido à ação de *Aspergillus niger* (Mendes et al., 2020). Nas condições estudadas do presente trabalho, os valores máximos de P em solução foram superiores a 0,200 mg L⁻¹, no tratamento *Aspergillus* + meio + pó de rocha não-autoclavado. O comportamento variou bastante entre os fungos estudados, mas estatisticamente não houve diferença dos tratamentos com fungos em relação aos controles sem microrganismos. Para *Aspergillus*, a única diferença observada foi entre o tratamento com meio + pó de rocha não-autoclavado e o já referido tratamento com *Aspergillus* + meio + pó de rocha autoclavado, não havendo diferenças estatísticas entre os demais. Para *Fusarium*, a mesma tendência entre tratamentos descrita para o *Aspergillus* foi observada.

Já para os tratamentos com *Trichoderma*, a liberação pelos tratamentos contendo o fungo foram numericamente menores do que os controles (sem fungo), sendo o tratamento *Trichoderma* + meio + pó de rocha não-autoclavado

estatisticamente similar ao tratamento meio + pó de rocha de rocha autoclavado. Esse resultado sugere que o *Trichoderma*, em comparação ao *Aspergillus* e *Fusarium* foi pouco eficiente na alteração da apatita. A ausência de relação significativa entre a biomassa de *Trichoderma* e o teor de P no meio (Tabela 6) sugere que os baixos teores do elemento observados nos tratamentos contendo o fungo não foram controlados pela absorção dos microrganismos.

O P é um nutriente indispensável no ambiente e o pH do solo pode ser um fator limitante à Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), tanto se for abaixo do desejável quanto acima, e a acidez está diretamente relacionada a aspectos nutricionais indesejáveis, como por exemplo, o menor teor de P, que apresenta maior disponibilidade próximo à neutralidade. Nos testes de correlação, P apresentou correlação positiva e significativa com o Ca, o Fe e o Mn, quando na presença de *Aspergillus*, o que faz sentido uma vez que estes dois possuem maior disponibilidade quando em pH abaixo de 5,0, enquanto que com o Si, a correlação foi negativa e significativa.

A correlação de Pearson foi positiva e significativa entre a variável biomassa e o P, o que indica que, quanto maior o teor de P no meio, maior é a biomassa do fungo, o que pode estar acontecendo em decorrência do ataque do microrganismo ao pó de rocha. A correlação também foi positiva e significativa com o Fe e o Na, o que não faz sentido devido ao fato de que o Fe tem maior disponibilidade quando o pH é menor e o meio com a presença do *Fusarium* foi mais alcalino.

Para o *Trichoderma*, o P só se correlacionou negativamente de forma significativa com os outros elementos (Si, K, Mg e Na), indicando que quando há aumento do teor de P no meio, esses outros elementos diminuem e vice-versa.

Nas figuras 6, 8 e 10, os gráficos mostram a relação dos microrganismos com o Enxofre (S). No meio de cultura puro, há uma pequena quantidade de S solúvel. Com a adição do pó de rocha autoclavado e não-autoclavado, o teor aumenta, sobretudo nos meios contendo rocha não autoclavada.

Em relação ao S, os tratamentos controles (meio + fungo) dos três gêneros aumentaram e foram muito parecidos com o controle meio puro. Em relação aos tratamentos com o pó de rocha não-autoclavado, para *Aspergillus*, *Fusarium* e *Trichoderma*, houve uma pequena diminuição em relação ao tratamento meio + pó de rocha não-autoclavado, o que quer dizer que houve uma solubilização

praticamente nula, o que é condizente com a mineralogia da rocha (que não tem minerais portadores de S). Sendo assim, é bastante provável que, mesmo nos tratamentos autoclavados para *Aspergillus* e *Fusarium*, a pequena quantidade de S dissolvida no meio seja derivada de metabólitos produzidos pelos fungos.

O S é outro elemento importante para o desenvolvimento dos microrganismos. No entanto, em maiores quantidades, pode ser tóxico. Este elemento apresenta maior disponibilidade quando próximo à neutralidade. Na presença de *Aspergillus* (que apresentou o meio mais ácido), o S apresentou correlação positiva e significativa com o Al, Ca, Fe, Mg, Mn e Na, o que faz sentido pelo fato de que parte desses elementos levam à acidificação do meio. Para o *Fusarium*, a correlação positiva e significativa foi observada na com o Al, Ca, Mg e Mn e para o *Trichoderma*, apenas com o Mn, o que não era esperado para esses dois microrganismos pois eles apresentaram os meios alcalinos.

7. RESUMOS E CONCLUSÕES

De forma geral, *Aspergillus* e *Trichoderma* apresentam maior eficiência na liberação de elementos do que o *Trichoderma*, como aconteceu para o Al, Fe, Mg e P. Para o Ca, Na e Si, sugere-se que não há distinção do efeito dos fungos em relação à ação provocada pela ação do meio e de possíveis organismos nativos presentes na rocha. O K também não apresentou diferença entre os tratamentos, embora fosse esperado que o elemento sofresse ação do *Aspergillus*. Por fim, Mn e S apresentaram teores baixos de solubilização, não apresentando diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos e estando em conformidade com a mineralogia da rocha. Pode-se inferir ainda que, para os três gêneros citados e as condições experimentais testadas, é necessário um tempo maior de contato entre o pó de rocha e as colônias fúngicas, para que uma possível distinção entre processos inorgânicos induzidos pelo contato dos minerais com o meio de cultura e a ação bioquímica/biomecânica dos fungos seja verificada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Alla, M.H., Omar, S.A., Omar, S.A. (2014) Survival os rhizobia/bradyrhizobia and a rock-phosphate-solubilizing fungus *Aspergillus niger* on various carriers from some agroindustril wastes and their effects on nodulation and growth of faba bean and soybean. *Journal of Plant Nutrition*, 24 (2):261-272.
- Adeleke, R.A., Cloete, T.E., Bertrand, A., Khasa, D.P. (2010) Mobilization of potassium and phosphorus from iron ore by ectomycorrhizal fungi. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26 (10): 1901–1913.
- Adeyemi, A. O., Gadd, G. M. (2005) Fungal degradation of calcium-, lead- and silicon-bearing minerals. *BioMetals*, 18 (3):269–281.
- Alexopoulos, C., Mims, C., Blackwell, M. (1996) *Introductory Mycology*. New York. 880p.
- Altomare, C., Norvell, W.A., Bjo, T., Harman, G.E. (1999) Solubilization of Phosphates and Micronutrients by the Plant-Growth-Promoting and Biocontrol Fungus *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. *ASM Journals*. 65 (7):2926–2933.
- Banfield, J.F., Barker, W.W., Welch, S.A., Taunton, A. (1999) Biological impact on mineral dissolution: application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96 (7):3404–3411.
- Barbarin, B. (1990) Granitoids: Main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting. *Geological Journal*, 25 (3–4):227–238.

- Barker, W.W., Welch, S.A., Chu, S., Banfield, J.F. (1998) Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. *American Mineralogist*, 83(11-12 PART 2):1551–1563.
- Bas, M.J.L.E., Streckeisen, A.L. (1991) The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*, 148:825–833.
- Bateman, G.L., Coskun, H. (1995) Populations of *Fusarium* spp. in soil growing continuous winter wheat, and effects of long-term application of fertilizers and of straw incorporation. *Mycological Research*, 99:1391–1394.
- Bateman, G.L., Murray, G. (2001) Seasonal variations in populations of *Fusarium* species in wheat-field soil. *Applied Soil Ecology*, 18:117–128.
- Bennett, J.W., Baker, S.E. (2010) An overview of the genus *Aspergillus*. In: Machida, M e Gomi, K. *Aspergillus: Molecular Biology and Genomics*. 1. ed. Reino Unido: Caister Academic Press, p. 1–17.
- Bulpa, P., Dive, A., Sibille, Y. (2007) Invasive pulmonary aspergillosis in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *European Respiratory Journal*, 30 (4):782–800.
- Burgess, L.W. (1981) General ecology of the Fusaria. In: Nelson, P.E., Tousson, T.A., Cook, R.J. *Fusarium: diseases, biology and taxonomy*. 1. ed. Pennsylvania State University Press, University Park, p. 225–235.
- Carvalho, W., Silva, D.D.V, Canilha, L., Mancilha, I. M. (2005) Aditivos alimentares produzidos por via fermentativa parte I: Ácidos Orgânicos. *Revista Analytica*, (18):70-76.
- Cerezine, P.C., Nahas, E., Banzatto, D.A. (1988) Microbiology Soluble phosphate accumulation by *Aspergillus niger* from fluorapatite. *Applied Microbiology and Biotechnology*, (29):501–505.
- Chen, S., Lian, B., Liu, C. (2008) Effect of *Bacillus mucilaginosus* on weathering of phosphorite and a preliminary analysis of bacterial proteins. *Chinese Journal of Geochemistry*, 27 (2):209–216.
- Comerford, N.B., Harris, W.G., Lucas, D. (1990) Release of Nonexchangeable Potassium from a Highly Weathered, Forested Quartzipsamment. *Soil Science Society of America Journal*, 54 (5):1421–1426.
- Condie, K.C. (1981) *Archean greenstone belts*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, p. 434.
- Dos Prazeres, J.N., Cruz, J.A.B., Pastore, G.M. (2006) Characterization of alkaline lipase from *Fusarium oxysporum* and the effect of different surfactants and detergents on the enzyme activity. *Brazilian Journal of Microbiology*, 37(4): 505–509.

- Druzhinina, I.S., Seidl-Seiboth, V., Herrera-Estrella, A., Horwitz, B.A., Kenerley, C.M., Monte, E., Mukherjee, P.K., Zeilinger, S., Grigoriev, I.V., Kubicek, C.P. (2011) *Trichoderma*: The genomics of opportunistic success. *Nature Reviews Microbiology*, 9 (10):749–759.
- Dutton, M.V., Evans, C.S. (1996) Oxalate production by fungi: Its role in pathogenicity and ecology in the soil environment. *Canadian Journal of Microbiology*, 42 (9):881–895.
- Ehrlich, H., Newman, D.K., Kappler, A. (2015) *Ehrlich's Geomicrobiology*. 6. ed. Boca Raton, Londres, Nova Iorque, CRC Press Taylor e Francis Group, p. 654.
- Finlay, R., Wallander, H., Smits, M., Holmstrom, S., van Hees, P., Lian, B., Rosling, A. (2009) The role of fungi in biogenic weathering in boreal forest soils. *Fungal Biology Reviews*, 23 (4):101–106.
- Fiore, S., Dumontet, S., Huertas, F.J., Pasquale, V. (2011) Bacteria-induced crystallization of kaolinite. *Applied Clay Science*, 53:566-571.
- Franco, V. (1995) Rock phosphate solubilization by *Aspergillus niger* grown on sugar-beet waste medium. *Applied Microbiology Biotechnology*, 44:546–549.
- Gadd, G.M. (2010) Metals, minerals and microbes: Geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156 (3):609–643.
- Gadd, G.M. (2017) The geomycology of elemental cycling and transformations in the environment. *ASM Journals*, 5 (1):371–386.
- Garrett, S.D. (Stephen D. (1970). *Pathogenic root-infecting fungi*. 1. ed. Cambridge University Press. London, England. 294p.
- Gilkes, R.J., Young, R.C., Quirk, J.P. (1972) The oxidation of octahedral iron in biotite. *Clays and Clay Minerals*, 20:303-315.
- Gleeson, D.B., Clipson, N., Melville, K., Gadd, G.M., McDermott, F.P. (2005) Characterization of fungal community structure on a weathered pegmatitic granite. *Microbial Ecology*, 50 (3):360–368.
- Glowa, K.R., Arocena, J.M., Massicotte, H.B. (2003) Extraction of potassium and/or magnesium from selected soil minerals by *Piloderma*. *Geomicrobiology Journal*, 20 (2):99–111.
- Goenadi, D.H., Siswanto, Sugiarto, Y. (2000) Bioactivation of Poorly Soluble Phosphate Rocks with a Phosphorus-Solubilizing Fungus. *Soil Science Society of America Journal*, 64:927-932.
- Govarthanan, M., Mythili, R., Kamala-Kannan, S., Selvankumar, T., Srinivasan, P., Kim, H. (2019) In-vitro bio-mineralization of arsenic and lead from aqueous solution and soil by wood rot fungus, *Trichoderma* sp. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174:699–705.

- Grewal, H.S., Kalra, K.L. (1995) Fungal production of citric acid. *Biotechnology Advances*, 13 (2):209–234.
- Guarçoni, A.M., Fanton, C.J. (2011) Granite processing waste as an alternative fertilizer for the coffee. *Revista Ciência Agronômica*, 42 (1):16-26.
- Gueidan, C., Villaseñor, C.R., de Hoog, G.S., Gorbushina, A.A., Untereiner, W.A., Lutzoni, F. (2008) A rock-inhabiting ancestor for mutualistic and pathogen-rich fungal lineages. *Studies in Mycology*, 61:111–119.
- Gulati, R., Isar, J., Kumar, V., Prasad, A.K., Parmar, V.S., Saxena, R.K. (2005) Production of a novel alkaline lipase by *Fusarium globulosum* using neem oil, and its applications. *Pure and Applied Chemistry*, 77 (1):251–262.
- Haldar, S.K. (2020) Sedimentary Rocks. In: Haldar, S.K. *Introduction to Mineralogy and Petrology*. 2. ed. Kolkata, West Bengal, India. p. 187-268S.
- Halla, J., Whitehouse, M.J., Ahmad, T., Bagai, Z. (2016) Granitóides arqueanos: uma visão geral e significado de uma perspectiva tectônica. *Geological Society*, 449:1-18.
- Heilimo, E., Halla, J., Huhma, H. (2011) Single-grain zircon U – Pb age constraints of the western and eastern sanukitoid zones in the finnish part of the Karelian Province. *Lithos*, 121 (1–4):87–99.
- Hirsch, P., Eckhardt, F.E.W., Palmer, R.J. (1995) Fungi active in weathering of rock and stone monuments. *Canadian Journal of Botany*, 73:1384-1390.
- Hue, N.V., Craddock, G.R., Adams, F. (1986) Effect of Organic Acids on Aluminum Toxicity in Subsoils. *Soil Science Society of America Journal*, 50 (1):28–34.
- Illmer, P., Schinner, F. (1992) Solubilization microorganisms of inorganic phosphates by isolated from forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 24 (4):389-395.
- Jahn, B.M., Glikson, A.Y., Peucat, J.J., Hickman, A.H. (1981) REE geochemistry and isotopic data of Archean silicic volcanics and granitoids from the Pilbara Block, Western Australia: implications for the early crustal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45 (9):1633–1652.
- Joshi, K.B., Bhattacharjee, J., Rai, G., Halla, J., Ahmad, T., Kurhila, M., Heilimo, E., Choudhary, A.K. (2017) The diversification of granitoids and plate tectonic implications at the archaean-Proterozoic boundary in the bundelkhand craton, central India. *Geological Society Special Publication*, 449(1), 123–157.
- Karaffa, M.L., Kubicek, C.P. (2003) *Aspergillus niger* citric acid accumulation: do we understand this well working black box? *Applied Microbiology and Biotechnology*, 61 (3):189-196.

- Kirtzel, J., Ueberschaar, N., Deckert-Gaudig, T., Krause, K., Deckert, V., Gadd, G. M., Kothe, E. (2020) Organic acids, siderophores, enzymes and mechanical pressure for black slate bioweathering with the basidiomycete *Schizophyllum commune*. *Environmental Microbiology*, 22 (4):1535–1546.
- Iamaguti, A.P.S. (2001) *Manual de Rochas Ornamentais para Arquitetos*. 1. ed. Rio Claro, São Paulo, 78p.
- Lapeyrie, F. (1990) The role of ectomycorrhizal fungi in calcareous soil tolerance by “symbiocalcicole” woody plants. *Annales Des Sciences Forestieres*, 47 (6): 579–589.
- Li, Z., Lu, X., Teng, H.H., Chen, Y., Zhao, L., Ji. J., Chen, J., Liu, L. (2019) Specificity of low molecular weight organic acids on the release of elements from lizardite during fungal weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 256:20-34.
- Lian, B., Wang, B., Pan, M., Liu, C., Teng. H.H. (2008) Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72:87-98.
- Liebhart, P. (1993) Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Textur und organische Substanz von Ackerböden im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 1). *Universität Für Bodenkultur Wien - Forschungsinformationssystem*, 45:199–210.
- Liebhart, V. P. (1994) Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Lagerungsdichte, Porenvolumen und Porengrößenverteilung von Ackerböden im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 3). *Institut Für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung Der Universität Für Bodenkultur*, (3):125–138.
- Liebhart, P., Eitzinger, J., Klaghofer, E. (1994) Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Infiltration und Bodenwasservorrat im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 4). *Universität Für Bodenkultur Wien - Forschungsinformationssystem Die Bodenkultur*, 45:297–311.
- Machado, D.F.M., Parzianello, F.R., Silva, A.C.F da., Antonioli, Z.I. (2012) *Trichoderma* no Brasil: o fungo e o bioagente. *Revista Ciências Agrárias*, 35 (1):274–288.
- Martin, H. (1994) The archean grey gnaisses and the genesis of continental crust. In: Condie, K.C. *Archean Crustal Evolution*. 11. ed. Elsevier Science, p. 205-259.
- Mattey, M. (1992) The Production of Organic Acids. *Critical Reviews in Biotechnology*, 12 (1-2):87-132.
- Mendes, G.O., Bahri-Esfahani, J., Csetenyi, L., Hillier, S., George, T.S., Gadd, G.M. (2020) Chemical and Physical Mechanism of Fungal Bioweathering of Rock Phosphate. *Geomicrobiology Journal*, (38):384-394.

- Moraes, R.D.O. (2004) Estudo da produção de *Trichoderma stromaticum* em fermentação em substrato sólido. Tese (Doutorado em Tecnologia Bioquímico-farmacêutica) – São Paulo – SP, Universidade de São Paulo – USP, 153p.
- Moreira, F.M.S., Siqueira, J.O. (2006) *Microbiologia e bioquímica do solo*. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 626p.
- Moyen, J.F. (2011) The composite Archaean grey gneisses: Petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archaean crustal growth. *Lithos*, 123 (1–4):21–36.
- Moyen, J., Martin, H., Jayananda, M., Auvray, B. (2003) Late Archaean granites: a typology based on the Dharwar Craton (India). *Precambrian Research*, 127 (1–3):103-123.
- Nelson, P.E., Dignani, M.C., Anaissie, E.J. (1994) Taxonomy, biology, and clinical aspects of *Fusarium* species. *Clinical Microbiology Reviews*, 7 (4):479–504.
- Ochs, M. (1996) Influence of humified and non-humified natural organic compounds on mineral dissolution. *Chemical Geology*, 132 (1-4):119–124.
- Paris, F. (1996) In vitro weathering of phlogopite by ectomycorrhizal fungi II. Effect of K⁺ and Mg²⁺ deficiency and N sources on accumulation of oxalate and H⁺. *Plant and Soil*, 179 (1):141–150.
- Paris, F., Bonnaud, P., Ranger, J., Lapeyrie, F. (1995) In vitro weathering of phlogopite by ectomycorrhizal fungi - I. Effect of K⁺ and Mg²⁺ deficiency on phyllosilicate evolution. *Plant and Soil*, 177 (2):191–201.
- Pekkarinen, A.I., Jones, B.L., Niku-Paavola, M.L. (2002) Purification and properties of an alkaline proteinase of *Fusarium culmorum*. *European Journal of Biochemistry*, 269 (3):798–807.
- Pinzari, F., Cuadros, J., Napoli, R., Canfora, L., Bardají, D.B. (2009) Routes of phlogopite weathering by three fungal strains. *Fungal Biology*, 120:1582-1599.
- Pinzari, F., Cuadros, J., Jungblut, A.D., Najorka, J., Humphreys-Williams, E. (2022) Fungal strategies of potassium extraction from silicates of different resistance as manifested in differential weathering and gene expression. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 316:168-200.
- Pitt, J., Hocking, A.D., Bhudhasamai, K., Miscamble, B.F., Wheeler, K.A. (1994) The normal mycoflora of commodities from Thailand . 2 . Beans , rice , small grains and other commodities. *International Journal Food Microbiology*, 23 (1):35-43.
- Raimbault, M. (1998) General and microbiological aspects of solid substrate fermentation. *Electronic Journal of Biotechnology*, 1 (3):114–140.

- Rifaat, H.M., El-mahalawy, A.A., El-menofy, H.A., Donia, S.A. (2010) Production, optimization and partial purification of lipase. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 5 (1):39–53.
- Rodríguez-Molina, M.C., Tello-Marquina, J.C., Torres-Vila, L.M., Bielza-Lino, P. (2000) Micro-scale systematic sampling of soil: heterogeneity in populations of *Fusarium oxysporum*, *F. solani*, *F. roseum* and *F. moniliforme*. *Journal of Phytopathology*, 614 (148):609–614.
- Rosling, A., Roose, T., Herrmann, A.M., Davidson, F.A., Finlay, R.D., Gadd, G.M. (2009) Approaches to modelling mineral weathering by fungi. *Fungal Biology Reviews*, 23 (4):138–144.
- Ruijter, G.J.G., Vondervoort, P.J.I. Van De, Visser, J. (1999) Oxalic acid production by *Aspergillus niger*: an oxalate-non-producing mutant produces citric acid at pH 5 and in the presence of manganese. *Microbiology*, 145 (9):2569-2576.
- Samson, R.A., Visagie, C.M., Houbraken, J., Hong, S.B., Hubka, V., Klaassen, C. H.W., Perrone, G., Seifert, K.A., Susca, A., Tanney, J.B., Varga, J., Kocsubé, S., Szigeti, G., Yaguchi, T., Frisvad, J.C. (2014) Phylogeny, identification and nomenclature of the genus *Aspergillus*. *Studies in Mycology*, 78 (1):141–173.
- Santos, I.S. dos, Neto, A.J. da C., Soares, T.L., Nunes, O.J. (2014) Influência da temperatura e do pH no crescimento micelial *in vitro* dos fungos causadores de fusariose do maracujazeiro. *Embrapa Mandioca e Fruticultura*, 202.
- Santos, K.R.A. dos (2017). *Análise da tolerância ao alumínio em Trichoderma harzianum*. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Goiânia – GO, Universidade Federal de Goiás – UFG, 65p.
- Santos, T.A. de. O. (2012) *Peptidases e lipases produzidas pelo fungo Fusarium oxysporum: caracterização e microencapsulação por spray drying*. Dissertação (Mestrado em Medicamentos e Cosméticos) – Ribeirão Preto – SP, Universidade de São Paulo – USP, 82p.
- Silva, F., Narloch, C., Schrarf, R. (2002) Solubilização de fosfatos naturais por microrganismos isolados de cultivos de *Pinus* e *Eucalyptus* de Santa Catarina. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 1:847–854.
- Singh, G., Chen, W., Rubiales, D., Moore, K., Sharma, Y.R., Gan, Y. (2007) Diseases and their Management. In: Yadav, S.S., Redden, R.J., Chen, W., Sharma, Y.R., *Chickpea Breeding and Management*, 1. ed. Wallingford, p. 497-519.
- Smits, M.M., Herrmann, A.M., Duane, M., Duckworth, O.W., Bonneville, S., Benning, L.G., Lundström, U. (2009) The fungal-mineral interface: Challenges and considerations of micro-analytical developments. *Fungal Biology Reviews*, 23 (4):122–131.
- Song, S.K., Huang, P.M. (1988) Dynamics of Potassium Release from Potassium-Bearing Minerals as Influenced by Oxalic and Citric Acids. *Soil Science*

Society of America Journal, 52 (2):383–390.

- Sperber, J. (1958) The incidence of apatite-solubilizing organisms in the rhizosphere and soil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 9 (6):778–781.
- Steinkellner, S., Langer, I. (2005) Impact of tillage on the incidence of *Fusarium* spp. in soil. *Plant and Soil*, 267:13–22.
- Steyaert, J.M., Weld, R.J., Stewart, A. (2010) Ambient pH intrinsically influences *Trichoderma* conidiation and colony morphology. *Fungal Biology*, 114 (2–3): 198–208.
- Streckeisen, A.L. (1967) Classification and nomenclature of igneous rocks. *Neus Jahrbuch für Mineralogie*, 107:144–240.
- Streckeisen, A.L. (1974) How should charnockitic rocks be named? *Annales de la Société Géologique de Belgique, Publications Spéciales = Special Publications, Géologie Des Domaines Cristallins - Centenaire de La Société Géologique de Belgique*, 100:349–360.
- Summerell, B.A., Laurence, M.H., Liew, E.C.Y., Leslie, J.F. (2010) Biogeography and phylogeography of *Fusarium*: a review. *Fungal Diversity*, 44:3–13.
- Sun, L.L., Xiao, L.L., Xiao, B., Wang, W.Y., Pan, C., Wang, S.J., Lian, B. (2013) Differences in the gene expressive quantities of carbonic anhydrase and cysteine synthase in the weathering of potassium-bearing minerals by *Aspergillus niger*. *Science China Earth Sciences*, 56 (12):2135–2140.
- Tesei, D., Marzban, G., Zakharova, K., Isola, D., Selbmann, L., Sterflinger, K. (2012) Alteration of protein patterns in black rock inhabiting fungi as a response to different temperatures. *Fungal Biology*, 116 (8):932–940.
- Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M. P., Frey-Klett, P. (2009) Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. *Trends in Microbiology*, 17 (8):378–387.
- Van Breemen, N., Finlay, R., Lundström, U., Jongmans, A.G., Giesler, R., Olsson, M. (2000) Mycorrhizal weathering: A true case of mineral plant nutrition? *Biogeochemistry*, 49 (1), 53–67.
- van Hunen, J., van den Berg, A.P. (2008) Plate tectonics on the early Earth: Limitations imposed by strength and buoyancy of subducted lithosphere. *Lithos*, 103 (1–2):217–235.
- Wallander, H., Hagerberg, D. (2004) Do ectomycorrhizal fungi have a significant role in weathering of minerals in forest soil? *Symbiosis*, 37 (1–3):249–257.
- Wheeler, K.A., Hurdman, B.F., Pitt, J.I. (1991) Influence of pH on the growth of some toxigenic species of *Aspergillus*, *Penicillium* and *Fusarium*. *International Journal of Food Microbiology*, 12 (2–3):141–149.

- Whitelaw, M.A. (2000) Growth promotion of plants inoculated with phosphate solubilizing fungi. *Advances in Agronomy*, 69:99-151.
- Winkelmann, G. (2007) Ecology of siderophores with special reference to the fungi. *BioMetals*, 20 (3–4):379–392.
- Witteveen, C.E.B., Vondervoort, P.J.I. Van De, Broeck, H.C. Van Den, Engelenburg, F.A.C. Van, Graaff, L.H. De, Hillebrand, M.H.B.C., Schaap, P.J., Visser, J. (1993) Induction of glucose oxidase, catalase, and lactonase in *Aspergillus niger*. *Current Genetics*, 24 (5):408-16.
- Xiao, B., Lian, B., Sun, L., Shao, W. (2012) Gene transcription response to weathering of K-bearing minerals by *Aspergillus fumigatus*. *Chemical Geology*, (1–9):306–307.
- Yuan, L., Huang, J., Li, X., Christie, P. (2004) Biological mobilization of potassium from clay minerals by ectomycorrhizal fungi and eucalypt seedling roots. *Plant and Soil*, 262 (1–2):351–361.
- Zavarzina, D.G, Chistyakova, N.I., Shapkin, A.V., Savenko, A.V., Zhilina, T.N., Kevbrin, V.V., Alekseeva, T.V., Mardanov, A.V., Gavrilov, S.N., Bychkov, A.Y. (2016) Oxidative biotransformation of biotite and glauconite by alkaliphilic anaerobes: The effect of Fe oxidation on the weathering of phyllosilicates. *Chemical Geology*, 439:98-109.
- Zubaidi A., Mcdonald G.K., Hollamby G.J. (1999) Nutrient uptake and distribution by bread and durum wheat under drought conditions in South Australia. *Australian Journal Experimental Agriculture*, 39:721-32

APÊNDICES

APÊNDICE A. Tabela com os valores médios (em mg L⁻¹) para os diferentes tratamentos na presença de *Aspergillus*.

<i>Aspergillus</i>					
Al					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,156 ^c	0,035	55,743	<0,001**	
Pó de rocha autoclavado	0,622 ^b	0,101			
Pó de rocha não-autoclavado	0,170 ^c	0,026			
<i>Aspergillus</i> + Meio	0,077 ^c	0,044			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	1,457 ^a	0,092			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,929 ^b	0,097			
Ca					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,552 ^b	0,114	39,14929 5	0,002*	
Pó de rocha autoclavado	10,024 ^{ab}	0,680			
Pó de rocha não-autoclavado	12,089 ^{ab}	1,481			
<i>Aspergillus</i> + Meio	0,528 ^b	0,139			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	15,547 ^a	0,825			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	12,429 ^{ab}	1,727			
Fe					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,082 ^b	0,005	70,389	< 0,001**	
Pó de rocha autoclavado	0,367 ^{ab}	0,055			
Pó de rocha não-autoclavado	0,091 ^{ab}	0,004			
<i>Aspergillus</i> + Meio	0,071 ^b	0,003			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	1,054 ^a	0,095			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,672 ^{ab}	0,020			
K					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	1,131	0,225	4,599415 9	0,097	
Pó de rocha autoclavado	1,572	0,101			
Pó de rocha não-autoclavado	1,432	0,058			
<i>Aspergillus</i> + Meio	1,085	0,176			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	1,684	0,067			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	1,637	0,030			

... Continuação...

<i>Aspergillus</i>					
Mg					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,014 ^d	0,014	41,774	<0,001**	
Pó de rocha autoclavado	0,466 ^c	0,072			
Pó de rocha não-autoclavado	0,515 ^{bc}	0,059			
<i>Aspergillus</i> + Meio	0,018 ^d	0,018			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,957 ^a	0,052			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,731 ^{ab}	0,093			
Mn					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,001 ^b	0,000	25,931	< 0,001**	
Pó de rocha autoclavado	0,058 ^{ab}	0,014			
Pó de rocha não-autoclavado	0,055 ^{ab}	0,014			
<i>Aspergillus</i> + Meio	0,001 ^b	0,000			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,138 ^a	0,007			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,104 ^{ab}	0,015			
Na					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	1,873 ^b	0,808	10,795	< 0,001**	
Pó de rocha autoclavado	4,701 ^{sb}	0,197			
Pó de rocha não-autoclavado	6,419 ^s	0,654			
<i>Aspergillus</i> + Meio	3,882 ^b	0,152			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	4,463 ^{sb}	0,165			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	4,836 ^{sb}	0,248			
P					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,058 ^{ab}	0,022	6,273	0,008*	
Pó de rocha autoclavado	0,098 ^{ab}	0,023			
Pó de rocha não-autoclavado	0,018 ^b	0,012			
<i>Aspergillus</i> + Meio	0,026 ^{ab}	0,011			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,239 ^a	0,052			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,275 ^{ab}	0,083			

... Continuação...

<i>Aspergillus</i>					
S					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,145 ^b	0,051	3,866	0,019*	
Pó de rocha autoclavado	0,231 ^{ab}	0,011			
Pó de rocha não-autoclavado	0,309 ^a	0,029			
<i>Aspergillus</i> + Meio	0,159 ^b	0,006			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,239 ^{ab}	0,018			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,248 ^{ab}	0,029			
Si					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	1,617 ^b	0,195	7,459	<0,001**	
Pó de rocha autoclavado	3,021 ^b	0,144			
Pó de rocha não-autoclavado	6,438 ^a	1,054			
<i>Aspergillus</i> + Meio	4,228 ^{ab}	0,377			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	3,839 ^{ab}	0,896			
<i>Aspergillus</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	2,706 ^b	0,372			

* indicam os valores significativos de *p*.

** indicam os valores altamente significativos de *p*.

a, ab, b, bc, c, d indicam os valores significativos entre os tratamentos.

APÊNDICE B. Tabela com os valores médios (em mg/L⁻¹) para os diferentes tratamentos na presença de *Fusarium*.

<i>Fusarium</i>					
Al					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,156	0,035	7,123	0,011*	
Pó de rocha autoclavado	0,622	0,101			
Pó de rocha não-autoclavado	0,170	0,026			
<i>Fusarium</i> + Meio	0,178	0,034			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,421	0,113			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,480	0,082			
Ca					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,552 ^b	0,114	25,086	0,003*	
Pó de rocha autoclavado	10,024 ^{ab}	0,680			
Pó de rocha não-autoclavado	12,089 ^{ab}	1,481			
<i>Fusarium</i> + Meio	1,450 ^{ab}	0,328			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	13,280 ^a	0,859			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	14,694 ^a	2,353			
Fe					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,082 ^b	0,005	13,743	0,002*	
Pó de rocha autoclavado	0,367 ^{ab}	0,055			
Pó de rocha não-autoclavado	0,091 ^{ab}	0,004			
<i>Fusarium</i> + Meio	0,111 ^{ab}	0,018			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,305 ^{ab}	0,048			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,474 ^a	0,073			
K					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	1,131 ^a	0,225	10,234	0,004*	
Pó de rocha autoclavado	1,572 ^a	0,101			
Pó de rocha não-autoclavado	1,432 ^a	0,058			
<i>Fusarium</i> + Meio	0,782 ^b	0,140			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	1,873 ^a	0,069			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	1,962 ^a	0,205			

... Continuação...

<i>Fusarium</i>					
Mg					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,014 ^b	0,014	19,756	<0,001**	
Pó de rocha autoclavado	0,466 ^a	0,072			
Pó de rocha não-autoclavado	0,515 ^a	0,059			
<i>Fusarium</i> + Meio	0,087 ^b	0,030			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,514 ^a	0,073			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,679 ^a	0,079			
Mn					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,001 ^b	0,000	12,772021	0,003*	
Pó de rocha autoclavado	0,058 ^a	0,014			
Pó de rocha não-autoclavado	0,055 ^a	0,014			
<i>Fusarium</i> + Meio	0,001 ^b	0,000			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,066 ^a	0,010			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,094 ^a	0,012			
Na					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	1,873 ^b	0,808	10,745	0,005*	
Pó de rocha autoclavado	4,701 ^{ab}	0,197			
Pó de rocha não-autoclavado	6,419 ^a	0,654			
<i>Fusarium</i> + Meio	4,635 ^{ab}	0,221			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	5,057 ^{ab}	0,235			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	5,312 ^{ab}	0,251			
P					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,058 ^{ab}	0,022	2,723	0,031*	
Pó de rocha autoclavado	0,098 ^{ab}	0,023			
Pó de rocha não-autoclavado	0,018 ^{ab}	0,012			
<i>Fusarium</i> + Meio	0,127 ^b	0,032			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,037 ^{ab}	0,017			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,163 ^a	0,058			

... Continuação...

<i>Fusarium</i>					
S					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,145 ^b	0,051	3,758	0,036*	
Pó de rocha autoclavado	0,231 ^{ab}	0,011			
Pó de rocha não-autoclavado	0,309 ^a	0,029			
<i>Fusarium</i> + Meio	0,174 ^{ab}	0,017			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,246 ^{ab}	0,015			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,228 ^{ab}	0,013			

Si					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	1,617 ^b	0,195	1,352	<0,001**	
Pó de rocha autoclavado	3,021 ^b	0,144			
Pó de rocha não-autoclavado	6,438 ^a	1,054			
<i>Fusarium</i> + Meio	3,226 ^b	0,533			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	3,343 ^b	0,626			
<i>Fusarium</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	2,783 ^b	0,324			

* indicam os valores significativos de *p*.

** indicam os valores altamente significativos de *p*.

a, b, ab indicam os valores significativos entre os tratamentos.

APÊNDICE C: Diferentes testes Anova (Dunnett, Dunn's e Tukey), para o elemento Mn em relação aos diferentes tratamentos quando na presença de Trichoderma.

One Way Analysis of Variance segunda-feira, 13 de junho de 2022 20:24:43

Data source: Data 1 in Notebook1

Dependent Variable: Mn

Normality Test (Shapiro-Wilk): Passed (P = 0,251)

Equal Variance Test (Brown-Forsythe): Failed (P < 0,050)

Test execution ended by user request, ANOVA on Ranks begun

Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks segunda-feira, 13 de junho de 2022 20:24:43

Data source: Data 1 in Notebook1

Group	N	Missing	Median	25%	75%
1,000	4	0	0,001000	0,001000	0,001000
2,000	4	0	0,0535	0,0338	0,0860
3,000	4	0	0,0555	0,0292	0,0795
4,000	4	0	0,001000	0,001000	0,001000
5,000	4	0	0,0540	0,0348	0,0755
6,000	4	0	0,0325	0,00225	0,0755

H = 14,891 with 5 degrees of freedom. (P = 0,011)

The differences in the median values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0,011)

To isolate the group or groups that differ from the others use a multiple comparison procedure.

Multiple Comparisons versus Control Group (Dunnett's Method) :

Comparison	Diff of Ranks	q'	P	P<0,050
2 vs 1	49,000	2,450	0,059	No
5 vs 1	48,000	2,400	0,067	Do Not Test
3 vs 1	47,500	2,375	0,071	Do Not Test
6 vs 1	35,500	1,775	0,263	Do Not Test
4 vs 1	0,000	0,000	1,000	Do Not Test

Note: The multiple comparisons on ranks do not include an adjustment for ties.

One Way Analysis of Variance

segunda-feira, 13 de junho de 2022 20:22:41

Data source: Data 1 in Notebook1

Dependent Variable: Mn

Normality Test (Shapiro-Wilk): Passed (P = 0,251)

Equal Variance Test (Brown-Forsythe): Failed (P < 0,050)

Test execution ended by user request, ANOVA on Ranks begun

Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks segunda-feira, 13 de junho de 2022 20:22:41

Data source: Data 1 in Notebook1

Group	N	Missing	Median	25%	75%
1,000	4	0	0,001000	0,001000	0,001000
2,000	4	0	0,0535	0,0338	0,0860
3,000	4	0	0,0555	0,0292	0,0795
4,000	4	0	0,001000	0,001000	0,001000
5,000	4	0	0,0540	0,0348	0,0755
6,000	4	0	0,0325	0,00225	0,0755

H = 14,891 with 5 degrees of freedom. (P = 0,011)

The differences in the median values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0,011)

To isolate the group or groups that differ from the others use a multiple comparison procedure.

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Dunn's Method) :

Comparison	Diff of Ranks	Q	P	P<0,050
2 vs 4	12,250	2,450	0,214	No
2 vs 1	12,250	2,450	0,214	Do Not Test
2 vs 6	3,375	0,675	1,000	Do Not Test
2 vs 3	0,375	0,0750	1,000	Do Not Test
2 vs 5	0,250	0,0500	1,000	Do Not Test
5 vs 4	12,000	2,400	0,246	Do Not Test
5 vs 1	12,000	2,400	0,246	Do Not Test
5 vs 6	3,125	0,625	1,000	Do Not Test
5 vs 3	0,125	0,0250	1,000	Do Not Test
3 vs 4	11,875	2,375	0,263	Do Not Test
3 vs 1	11,875	2,375	0,263	Do Not Test
3 vs 6	3,000	0,600	1,000	Do Not Test
6 vs 4	8,875	1,775	1,000	Do Not Test
6 vs 1	8,875	1,775	1,000	Do Not Test
1 vs 4	0,000	0,000	1,000	Do Not Test

Note: The multiple comparisons on ranks do not include an adjustment for ties.

One Way Analysis of Variance

segunda-feira, 13 de junho de 2022 20:23:30

Data source: Data 1 in Notebook1

Dependent Variable: Mn

Normality Test (Shapiro-Wilk): Passed (P = 0,251)

Equal Variance Test (Brown-Forsythe): Failed (P < 0,050)

Test execution ended by user request, ANOVA on Ranks begun

Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks segunda-feira, 13 de junho de 2022 20:23:30

Data source: Data 1 in Notebook1

Group	N	Missing	Median	25%	75%
1,000	4	0	0,001000	0,001000	0,001000
2,000	4	0	0,0535	0,0338	0,0860
3,000	4	0	0,0555	0,0292	0,0795
4,000	4	0	0,001000	0,001000	0,001000
5,000	4	0	0,0540	0,0348	0,0755
6,000	4	0	0,0325	0,00225	0,0755

H = 14,891 with 5 degrees of freedom. (P = 0,011)

The differences in the median values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0,011)

To isolate the group or groups that differ from the others use a multiple comparison procedure.

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparison	Diff of Ranks	q	P	P<0,050
2 vs 4	49,000	3,465	0,139	No
2 vs 1	49,000	3,465	0,139	Do Not Test
2 vs 6	13,500	0,955	0,985	Do Not Test
2 vs 3	1,500	0,106	1,000	Do Not Test
2 vs 5	1,000	0,0707	1,000	Do Not Test
5 vs 4	48,000	3,394	0,156	Do Not Test
5 vs 1	48,000	3,394	0,156	Do Not Test
5 vs 6	12,500	0,884	0,989	Do Not Test
5 vs 3	0,500	0,0354	1,000	Do Not Test
3 vs 4	47,500	3,359	0,165	Do Not Test
3 vs 1	47,500	3,359	0,165	Do Not Test
3 vs 6	12,000	0,849	0,991	Do Not Test
6 vs 4	35,500	2,510	0,482	Do Not Test
6 vs 1	35,500	2,510	0,482	Do Not Test
1 vs 4	0,000	0,000	1,000	Do Not Test

Note: The multiple comparisons on ranks do not include an adjustment for ties.

APÊNDICE D. Tabela com os valores médios (em mg/L⁻¹) para os diferentes tratamentos na presença de *Trichoderma*.

<i>Trichoderma</i>					
Al					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,156	0,035	39,951	0,098	
Pó de rocha autoclavado	0,622	0,101			
Pó de rocha não-autoclavado	0,170	0,026			
<i>Trichoderma</i> + Meio	0,145	0,017			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,334	0,132			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,131	0,010			
Ca					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,552 ^b	0,114	28,699	0,004*	
Pó de rocha autoclavado	10,024 ^{ab}	0,680			
Pó de rocha não-autoclavado	12,089 ^a	1,481			
<i>Trichoderma</i> + Meio	0,939 ^{ab}	0,192			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	9,769 ^{ab}	0,885			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	10,047 ^{ab}	1,397			
Fe					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,082 ^b	0,005	4,137	0,003*	
Pó de rocha autoclavado	0,367 ^a	0,055			
Pó de rocha não-autoclavado	0,091 ^{ab}	0,004			
<i>Trichoderma</i> + Meio	0,085 ^{ab}	0,000			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,242 ^a	0,127			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,093 ^{ab}	0,003			
K					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	1,131 ^{ab}	0,225	4,246	0,016*	
Pó de rocha autoclavado	1,572 ^{ab}	0,101			
Pó de rocha não-autoclavado	1,432 ^{ab}	0,058			
<i>Trichoderma</i> + Meio	1,064 ^b	0,196			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	1,689 ^{ab}	0,046			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	1,721 ^a	0,141			

... *Continuação...*

<i>Trichoderma</i>					
Mg					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,014 ^b	0,014	25,897	0,005*	
Pó de rocha autoclavado	0,466 ^{ab}	0,072			
Pó de rocha não-autoclavado	0,515 ^a	0,059			
<i>Trichoderma</i> + Meio	0,073 ^{ab}	0,005			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,412 ^{ab}	0,042			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,453 ^{ab}	0,020			
Mn					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,001	0,000	4,710	0,011*	
Pó de rocha autoclavado	0,058	0,014			
Pó de rocha não-autoclavado	0,055	0,014			
<i>Trichoderma</i> + Meio	0,001	0,000			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,055	0,011			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,037	0,020			
Na					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	1,873 ^b	0,808	12,277	0,001**	
Pó de rocha autoclavado	4,701 ^{ab}	0,197			
Pó de rocha não-autoclavado	6,419 ^a	0,654			
<i>Trichoderma</i> + Meio	3,987 ^{ab}	0,148			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	5,238 ^{ab}	0,118			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	5,423 ^a	0,215			
P					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,058	0,022	2,333	0,030*	
Pó de rocha autoclavado	0,098	0,023			
Pó de rocha não-autoclavado	0,018	0,012			
<i>Trichoderma</i> + Meio	0,104	0,028			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,041	0,024			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,021	0,005			

... Continuação...

<i>Trichoderma</i>					
S					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	0,145 ^a	0,051	3,645	0,031*	
Pó de rocha autoclavado	0,231 ^{ab}	0,011			
Pó de rocha não-autoclavado	0,309 ^a	0,029			
<i>Trichoderma</i> + Meio	0,180 ^b	0,017			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	0,211 ^{ab}	0,012			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	0,234 ^{ab}	0,011			
Si					
Tratamentos	Média	Erro	F	<i>p</i>	
Meio Puro	1,617 ^b	0,195	4,242	0,011*	
Pó de rocha autoclavado	3,021 ^{ab}	0,144			
Pó de rocha não-autoclavado	6,438 ^{ab}	1,054			
<i>Trichoderma</i> + Meio	3,299 ^{ab}	0,462			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha autoclavado	6,869 ^a	1,951			
<i>Trichoderma</i> + Meio + Pó de rocha não-autoclavado	6,197 ^{ab}	1,309			

* indicam os valores significativos de *p*.

** indicam os valores altamente significativos de *p*.

a, b, ab indicam os valores significativos entre os tratamentos.