



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

NEILSON ROCHA DA SILVA

**RETRAÇÃO DE GELEIRAS NA ANTÁRTICA MARÍTIMA PROMOVE MUDANÇAS
BIOQUÍMICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E ALTERA AS
COMUNIDADES MICROBIANAS**

FORTALEZA

2023

NEILSON ROCHA DA SILVA

RETRAÇÃO DE GELEIRAS NA ANTÁRTICA MARÍTIMA PROMOVE MUDANÇAS
BIOQUÍMICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E ALTERA AS COMUNIDADES
MICROBIANAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ecologia e Recursos Naturais. Área de concentração: Ecologia e Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Teogenes Senna de Oliveira.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S581r Silva, Neilson Rocha da.
Retração de geleiras na Antártica Marítima promove mudanças bioquímicas da matéria orgânica do solo e altera as comunidades microbianas / Neilson Rocha da Silva. – 2023.
143 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais , Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Teogenes Senna de Oliveira.
1. Comunidades vegetais. 2. Aromaticidade. 3. Fungos. 4. Estabilidade do solo. 5. Acidez do solo. I.
Título.

CDD 577

NEILSON ROCHA DA SILVA

RETRAÇÃO DE GELEIRAS NA ANTÁRTICA MARÍTIMA PROMOVE MUDANÇAS
BIOQUÍMICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E ALTERA AS COMUNIDADES
MICROBIANAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ecologia e Recursos Naturais da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção
do título de Doutor em Ecologia e Recursos Naturais.
Área de concentração: Ecologia e Recursos Naturais.

Aprovada em 28/02/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Teogenes Senna de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Prof.^a Dra. Suzana Claudia Silveira Martins
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Deborah Pinheiro Dick
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. José João Lélis Leal De Souza
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Prof. Dr. Maurício Dutra Costa
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração a todas as entidades que têm me guiado pelos caminhos da vida e me protegido durante todas as atividades que tenho desempenhado.

Aos meus queridos pais, Helenice e José Ribamar, gostaria de expressar minha imensa gratidão por todo o apoio e dedicação que vocês têm proporcionado ao longo dos meus estudos. Cada conquista alcançada é resultado direto da confiança que vocês depositaram em mim e do encorajamento para seguir meus propósitos. Obrigado por serem minha base, meu porto seguro e por acreditarem em mim.

Ao meu orientador Teógenes Senna de Oliveira, expresso minha profunda gratidão pela oportunidade de conduzir pesquisas de campo em locais tão singulares como a Antártica e o Nordeste do Brasil. O desenvolvimento da tese foi um desafio significativo, e reconheço os esforços que você empreendeu para garantir o progresso da pesquisa. Sua orientação e apoio foram fundamentais, e valorizo os momentos compartilhados ao longo dessa jornada acadêmica.

Às bancas de projeto, qualificação e defesa, expresso minha profunda gratidão pela valiosa contribuição e sugestões que enriqueceram significativamente esta tese. Gostaria de estender meus agradecimentos às professoras Emanuelle M. B. Soares, Deborah Pinheiro Dick e Suzana Claudia Silveira Martins, assim como aos professores Carlos E. G. R. Schaefer, Maurício Dutra Costa, Marcio R. Francelino, José J. L. Souza e Tiago O. R. Ferreira, que generosamente dedicaram seu tempo e conhecimento a este trabalho. Suas orientações foram fundamentais para o desenvolvimento e aprimoramento desta pesquisa.

Ao laboratório Matéria Orgânica e Resíduos (Labmor) onde desenvolvi as análises da tese, em especial a técnica Paloma Sousa pelo tempo compartilhado e apoio técnico na análise realizadas.

Ao laboratório de isótopos estáveis (LIE), onde fui cordialmente bem recebido para realizar os procedimentos de pré-tratamento de amostras e uso do cromatógrafo gasoso com espectrômetro de massa (CG-SM).

À Coordenação e ao secretário (a) do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da UFC por auxiliar em processos internos para acareação de fundos para pesquisa, mobilidade acadêmica, entre outros recursos ofertados pelo programa.

À UFV, especialmente ao Departamento de Solos, por me receber e proporcionar o aprendizado por meio de disciplinas, além de poder realizar minhas atividades de pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), código de financiamento 001, pela concessão de bolsa e auxílio à pesquisa.

Ao prof. Márcio Francelino coordenador do projeto Terrantar e ao Proantar/Marinha do Brasil pelos esforços e financiamento da pesquisa.

Ao prof. André Thomazini pelas orientações de campo e por tornar o convívio social melhor na Antártica.

À todos meus amigos que fiz durante o campo e aos de laboratório, especialmente ao Hugo Silva e Naiara Figueiredo, por toda ajuda e descontração oferecida nos momentos difíceis.

Gostaria de aproveitar este momento para expressar meu sincero agradecimento a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para este trabalho. Suas orientações, apoio e insights foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão desta tese. Agradeço a todos aqueles que generosamente compartilharam seu conhecimento, forneceram feedback construtivo e ofereceram seu tempo e esforço para tornar este trabalho possível. Cada contribuição, por menor que fosse, teve um impacto significativo e é apreciada profundamente. Seu apoio coletivo enriqueceu esta jornada acadêmica e resultou em um trabalho do qual estou verdadeiramente orgulhoso. Muito obrigado a todos.

RESUMO

Nas últimas décadas, a Antártica vem passando por grandes retrações de geleiras, expondo rochas e promovendo o desenvolvimento de solos. Nas áreas livres de gelo, a compreensão da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), sua composição bioquímica e as comunidades microbianas são limitadas, sobretudo quando se trata dos efeitos das retrações das geleiras e a drenagem dos solos. Com isso, os objetivos deste estudo foram: (i) revisar os efeitos do aquecimento global sobre processos envolvendo a dinâmica da MOS na Península Antártica e Antártica Marítima; e (ii) analisar as mudanças na composição bioquímica da MOS e nas comunidades microbianas do solo em recuos de geleiras da Antártica Marítima sob diferentes ambientes e coberturas vegetais. Para isso, foi realizado um estudo de revisão e compilação das informações sobre a dinâmica da MOS visando o primeiro objetivo. O segundo objetivo foi alcançado coletando amostras de solo e vegetação para realização de análises físicas e químicas do solo, da composição bioquímica da MOS e das comunidades microbianas. As coletas das amostras foram realizadas em sítios, cujos critérios adotados foram os processos geomorfológicos dominantes e a cobertura vegetal, formando um transecto geleira - costa marinha, com diferentes distâncias das geleiras. O solo, com tamanho < 2 mm foi fracionado em matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) para determinação dos teores de carbono (C), nitrogênio (N) e composição bioquímica. Os teores de C orgânico foram determinados por Walkey Black e de N total pelo método Kjeldahl, enquanto as moléculas orgânicas foram extraídas pela técnica de termoquimólise. Já a caracterização das comunidades microbianas foi realizada pela extração e análise de ácidos graxos fosfolipídicos (PLFA). Os resultados revelaram que a estabilização do solo condicionou a fixação de plantas promovendo mudanças na composição bioquímica da MOS e nas comunidades microbianas, especialmente na superfície do solo, no caso fungos. No entanto, as mudanças na composição bioquímica da matéria orgânica e nas comunidades microbianas associadas com as retrações das geleiras não promoveram mudanças significativas nos teores de C e N, tanto da MOAM quanto MOP. A MOAM apresentou mudanças de uma matéria orgânica de origem microbiana (abundante em lipídios), nos sítios próximos às geleiras, para uma vegetal (maior aromaticidade e maior abundância de carboidratos, terpenos e biopolímeros) nos sítios mais distantes das geleiras, podendo chegar a redução de até 80% dos lipídios entre um e outro, por exemplo. Tais resultados revelaram a grande importância das comunidades criptógamas e

criptoendolíticas nas alterações da composição molecular da MOS. Já a análise de PLFA mostrou a mudança do domínio bacteriano para o fúngico com a retração das geleiras. O aumento da presença de fungos atingiu 66%, e isso pode estar relacionado à ocupação de criptoendolíticas nos sítios mais distantes das geleiras, onde a presença predominante de líquens se agrupa com os níveis de nitrogênio total e das frações de matéria orgânica solúvel (MOS), terpenos e carboidratos. Concluiu-se que os solos mais drenados e estabilizados da Antártica Marítima, levaram ao aumento da comunidade fúngica na superfície dos solos de sítios mais distantes das geleiras, junto ao aumento de terpenos e carboidratos produzidos por plantas. Já na subsuperfície do solo, a compilação de dados permitiu identificar que a profundidade de 10-15 cm foi o microhabitat do solo capaz de ofertar as melhores condições ambientais e de recursos para as comunidades microbianas.

Palavras-chave: comunidades vegetais; aromaticidade; fungos; estabilidade do solo e acidez do solo.

ABSTRACT

In recent decades, Antarctica has undergone significant glacier retreats, exposing rocks and promoting soil development. Understanding soil organic matter (SOM) dynamics, its biochemical composition, and microbial communities in ice-free areas is limited, especially regarding the effects of glacier retreats and soil drainage. This study aimed to (i) review the effects of global warming on SOM dynamics in the Antarctic Peninsula and Maritime Antarctica and (ii) analyze changes in SOM biochemical composition and soil microbial communities in glacier retreat areas of Maritime Antarctica under different environments and vegetation cover. The study conducted a review and compilation of SOM dynamics information for the first objective, while the second objective involved collecting soil and vegetation samples for physical and chemical analyses of soil, SOM biochemical composition, and microbial communities. Sample collections were made at sites determined by dominant geomorphological processes and vegetation cover, forming a glacier-coast marine transect with varying glacier distances. Soil < 2 mm was fractionated into particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAM) for carbon (C), nitrogen (N), and biochemical composition determination. Organic C levels were determined using the Walkley Black method, total N with the Kjeldahl method, and organic molecules were extracted through thermochemolysis. Microbial community characterization was performed by extracting and analyzing phospholipid fatty acids (PLFA). Results revealed that stabilized soil influenced plant colonization, leading to changes in SOM biochemical composition and microbial communities, particularly in the surface soil, with an impact on fungi. However, changes in SOM biochemical composition and microbial communities associated with glacier retreats did not significantly affect C and N levels in both MAM and POM. MAM showed changes from microbial-origin organic matter (abundant in lipids) near glaciers to plant-origin organic matter (higher aromaticity and abundance of carbohydrates, terpenes, and biopolymers) further from glaciers, with up to an 80% reduction in lipids, for instance. These findings highlighted the crucial role of cryptogamic and cryoendolithic communities in altering the molecular composition of SOM. The PLFA analysis indicated a shift from a bacterial-dominated to a fungal-dominated domain with glacier retreats. The increased presence of fungi reached 66%, possibly linked to cryoendolithic occupation in sites further from glaciers, where the dominant presence of lichens correlated with total nitrogen levels and soluble organic matter (SOM), terpenes, and

carbohydrates fractions. In conclusion, well-drained and stabilized soils in Maritime Antarctica led to an increase in surface soil fungal communities in sites further from glaciers, along with an increase in terpenes and carbohydrates produced by plants. In the subsurface soil, data compilation identified the 10-15 cm depth as the microhabitat providing the best environmental conditions and resources for microbial communities.

Key words: plant communities; aromaticity; fungi; soil stability; and soil acidity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	13
2	A OCUPAÇÃO DE GRAMÍNEAS E O AUMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA NA ANTÁRTICA OCIDENTAL PODEM INTENSIFICAR A DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS MAIS DESENVOLVIDOS.....	14
2.1	Introdução.....	16
2.2	O deslocamento da comunidade microbiana para camadas mais profundas do solo.....	19
2.3	Solos mais desenvolvidos da Antártica possuem as melhores condições químicas para a atividade microbiana.....	23
2.4	Desenvolvimento do solo e aumento da disponibilidade de água podem acelerar a degradação e mudanças na matéria orgânica da Península Antártica.....	26
2.5	Proteção física da matéria orgânica do solo.....	27
2.6	Rotatividade da matéria orgânica: textura do solo e ocupação vegetal.....	28
2.7	Degradação da matéria orgânica do solo.....	30
2.8	Respiração do solo e perdas de C por emissões de CO ²	32
2.9	Relação C:N pode ser indicadora de resistência à degradação ou estabilidade da MOS na Antártica?.....	33
2.10	Considerações.....	35
2.11	Críticas/Lacunas:.....	35
2.12	Material suplementar.....	36
3	TENDÊNCIAS BIOQUÍMICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO ANTÁRTICO EM RESPOSTA À RETRAÇÃO DAS GELEIRAS: IMPLICAÇÕES PARA O CICLO DO CARBONO.....	39
3.1	Introdução.....	41
3.2	Materiais e método.....	42
3.2.1	Área de estudo.....	42
3.2.2	Amostragem de solo e vegetação.....	44

3.2.3	<i>Frações de calhaus, cascalhos, granulometria e complexo sortivo do solo</i>	47
3.2.4	<i>C orgânico e N totais e da matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM)</i>	47
3.2.5	<i>Extração de compostos pela técnica de termoquimólise (TMAH)</i>	48
3.2.6	<i>Análise de dados</i>	49
3.3	RESULTADOS	50
3.3.1	<i>Caracterização física, química e teores de C e N do solo</i>	50
3.3.2	<i>Composição molecular das espécies vegetais superiores e inferiores (criptogamas e criptoendolíticas)</i>	55
3.3.3	<i>Compostos moleculares da matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) do solo</i>	56
3.4	Discussão	67
3.5	Conclusões	74
3.6	Material suplementar	75
4	RETRAÇÃO DE GELEIRAS E SOLOS DRENADOS DIVERSIFICAM COMUNIDADES MICROBIANAS E AUMENTAM A ABUNDÂNCIA DE FUNGOS NA ANTÁRTICA MARÍTIMA	90
4.1	Introdução	92
4.2	Material e métodos	93
4.2.1	<i>Área de estudo</i>	93
4.2.2	<i>Amostragem de solo e vegetação</i>	94
4.2.3	<i>Análise de ácidos graxos fosfolipídicos (PLFA)</i>	97
4.2.4	<i>Análise de dados</i>	99
4.3	Resultados	99
4.4	Discussão	105
4.5	Conclusão	108
4.6	Material suplementar	109
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
	REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO GERAL

As regiões polares representam a maior parte da criosfera Terrestre e são muito sensíveis ao aquecimento global. Nas últimas duas décadas apresentaram rápidas retrações das geleiras (POST *et al.*, 2019). Essas retrações vêm impactando muitas espécies dependentes do gelo ou de outras regiões afetadas pelo degelo (como zonas costeiras), gerando perda de vida e de habitats (DING *et al.*, 2021; FOUNTAIN *et al.*, 2012). Apesar disso, no Polo Sul, a Antártica oferta novos habitats não glaciais para aclimatização e ocupação de espécies, pois o gelo encontra-se predominantemente sobre um continente, onde a criosfera dá lugar ao solo.

O território Antártico pode ser dividido em duas regiões biogeográficas: (i) Subantártica e (ii) Antártica, subdividida em Marítima, Ocidental e Oriental (RIVAS-MARTÍNEZ *et al.*, 2021). Na Antártica, a região Marítima e a Ocidental são fortemente afetadas pelo aquecimento global, onde 87 % das geleiras podem estar em retração, como no caso da Península Antártica (localizada na Antártica Ocidental) (BENTLEY *et al.*, 2009; COOK *et al.*, 2005). A retração de geleiras nestas regiões promove a formação de solos e a ocupação vegetal, levando a uma maior homogeneidade das emissões de CO₂ em consequência da maior respiração do solo (THOMAZINI *et al.*, 2014).

Neste contexto, o avanço do desenvolvimento dos solos e da ocupação vegetal tem chamado atenção de pesquisadores quanto a estabilidade dos reservatórios de C da Antártica. Pesquisas têm sugerido a intensificação da degradação da matéria orgânica do solo (MOS) oriunda de plantas inferiores, pela exposição às comunidades microbianas e a plantas superiores com sistemas radiculares mais profundos (HILL *et al.*, 2019), podendo gerar altas emissões de CO₂ (THOMAZINI *et al.*, 2016b). Outras pesquisas revelam que a elevação de temperatura na Antártica aumentará a degradação e a mineralização da MOS, além de reduzir sua permanência no solo (BARRETT *et al.*, 2005; HOPKINS *et al.*, 2009; KIM *et al.*, 2021; PIRES *et al.*, 2017).

A matéria orgânica do solo, apesar de não constituir lignina e apresentar baixa relação C:N, possui uma fração considerável de compostos aromáticos (ABAKUMOV, 2017; ABAKUMOV *et al.*, 2022; ABAKUMOV; ALEKSEEV, 2018a; BEYER *et al.*, 1995). Estudos revelam uma abundância entre 20 e 30% de aromaticidade (ABAKUMOV, 2017; ABAKUMOV *et al.*, 2022). Neste contexto, o entendimento da dinâmica da MOS e das suas alterações bioquímicas, além das mudanças nas comunidades microbianas são fundamentais para prever tendências das reservas de C da Antártica, em resposta ao aquecimento global.

2 A OCUPAÇÃO DE GRAMÍNEAS E O AUMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA NA ANTÁRTICA OCIDENTAL PODEM INTENSIFICAR A DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS MAIS DESENVOLVIDOS

Resumo: No Holoceno, o surgimento de plataformas marinhas na Antártica possibilitou a transferência da matéria orgânica por animais marinhos para o ambiente terrestre, propiciando seu acúmulo. Atualmente, os aumentos de temperatura vêm promovendo a formação de novos ecossistemas terrestres não glaciais. Apesar dos novos ecossistemas estarem livres de extremos climáticos, ainda são regidos pelos ciclos de congelamento e descongelamento, que podem limitar a dinâmica da matéria orgânica em solos rasos como dos Vales Secos. Por outro lado, os solos mais desenvolvidos podem romper as barreiras impostas pelo frio dos ciclos de congelamento e descongelamento na superfície do solo e promover o aumento da temperatura, da atividade microbiana e a colonização vegetal, intensificando a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS). Neste contexto, a presente revisão visa compreender os efeitos do aquecimento global na Península Antártica e Antártica Marítima sobre o ciclo do carbono (C), especialmente os processos envolvendo a matéria orgânica do solo (MOS), em aspectos tais como: a participação do C, N e P e demais nutrientes, a dos componentes bióticos (vegetação e comunidade microbiana), a emissão de CO₂, a qualidade da MOS (p.e. relação C:N) e a estrutura do solo. Os resultados da revisão demonstram que uma série de eventos que levaram ao aumento da respiração do solo conforme o avanço do aquecimento global, o que, provavelmente, está associado às perdas de C via CO₂ com a ciclagem MOS, reduzindo o seu tempo de permanência no solo.

Palavras - chave: retração de geleiras, matéria orgânica do solo, emissões de CO₂, vegetação e subsolo.

Abstract: During the Holocene, the emergence of marine platforms in Antarctica enabled the transfer of organic matter by marine animals to the terrestrial environment, facilitating its accumulation. Currently, temperature increases are promoting the formation of new non-glacial terrestrial ecosystems. Despite these new ecosystems being free from extreme climatic conditions, they are still governed by freeze-thaw cycles, which can limit the dynamics of organic matter in shallow soils, such as those found in the Dry Valleys. On the other hand, more developed soils can overcome the barriers imposed by the cold of freeze-thaw cycles on the surface and promote increased temperature, microbial activity, and vegetation colonization, intensifying the dynamics of soil organic matter (SOM). In this context, the present review aims to understand the effects of global warming on the Antarctic Peninsula and Maritime Antarctica regarding the carbon (C) cycle, especially processes involving soil organic matter (SOM), such as C, N, P, and other nutrient participation, biotic components (vegetation and microbial communities), CO₂ emissions, SOM quality (e.g., C:N ratio), and soil structure. The review results demonstrate a series of events leading to increased soil respiration as global warming advances, likely associated with C losses via CO₂ during SOM cycling, reducing its residence time in the soil.

Key words: glacier retreat, soil organic matter, CO₂ emissions, vegetation, and subsoil.

2.1 Introdução

As mudanças climáticas tem promovido na Antártica a retração das geleiras, o soerguimento glacioisostático, tectônica e eventos isostáticos (MICHEL *et al.*, 2014). Em outras palavras são movimentos verticais da litosfera por meio da elevação de placas tectônicas e da massa terrestre, e suas relações com a atmosfera (KUHLE, 1995; WALCOTT, 1972; THORSON, 1989; FIRTH; STEWART, 2000). Esses acontecimentos revelaram uma série de plataformas marinhas no Holoceno (MICHEL *et al.*, 2014) e a formação de novas paisagens não glaciais (MACHADO *et al.*, 2019).

Nestas plataformas, o intemperismo é marcado, inicialmente, por processos criogênicos (BARSCH *et al.*, 1985). Com o passar do tempo, as plataformas passaram a ser frequentadas por animais marinhos, possibilitando a transferência e acúmulo de nutrientes e matéria orgânica (MO) para o ambiente terrestre. Entretanto, o avanço da deglaciação vem promovendo soerguimento glacio-eustático desses terrenos. O incremento de altitude induz processos erosivos aumentando também a declividade do terreno. Essas modificações, somadas a maior distância da costa, dificultam o acesso dos animais e estas acabam abandonadas, sendo colonizadas pela vegetação (TATUR; MYRCHA, 1984; TATUR; MYRCHA; NIEGODZISZ, 1997). Assim, as atividades bióticas (animais, plantas e microrganismos) passaram a intensificar os processos de formação de solos e as modificações do relevo (TATUR; MYRCHA; NIEGODZISZ, 1997; ZHANG *et al.*, 2018).

Atualmente, a Antártica possui entre 45,88 km² e 58,50 km² de área livre de gelo, ou seja, menos de 1% da sua área total (BROOKS *et al.*, 2019; TERAUDS; LEE, 2016). Nas próximas décadas estas áreas podem progredir ainda mais rápido devido ao aquecimento global, como consequência das maiores taxas de emissão de CO₂ tanto antrópica quanto pelos ecossistemas (retroalimentação positiva) (DAI *et al.*, 2020; DENG *et al.*, 2021; KRINNER *et al.*, 2013; MARDANI *et al.*, 2019). Neste contexto, a Península Antártica passa por um rápido aquecimento, com 87% das geleiras em retração (BENTLEY *et al.*, 2009; COOK *et al.*, 2005), tornando-se uma das maiores regiões não glaciais com perturbação da massa terrestre e reconhecida por conter a maior diversidade biótica do continente (BERGSTROM; CONVEY; HUISKES, 2006; BROOKS *et al.*, 2019).

Apesar dos novos ecossistemas estarem livres de extremos climáticos permanentes (geleira), ainda assim são regidos pelos ciclos de congelamento e descongelamento (BALKS *et al.*, 2013). O congelamento do ambiente pode ser empecilho para a atividade da biota, especialmente para a comunidade microbiana, afetando a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS). As temperaturas negativas afetam a térmica e a disponibilidade de água no solo, tornando a atividade e crescimento microbiano ainda mais limitado em solos hidromórficos e com permafrost (BEYER *et al.*, 1995, 1998, 1999, 2000; BEYER; WHITE; BÖLTER, 2001). Na Antártica essas condições podem aumentar o tempo de permanência da MOS em solos rasos, promovendo o acúmulo desse material a partir o soerguimento das plataformas marinhas (BEYER; WHITE; BÖLTER, 2001). No entanto, em regiões mais biodiversas e com rápido aquecimento climático, como a Península Antártica e a Antártica Marítima, a perda do permafrost e o aumento da camada ativa dos solos mais desenvolvidos podem não favorecer a conservação da MOS, aumentando a ciclagem do C (BENAVENT-GONZÁLEZ *et al.*, 2018; PIRES *et al.*, 2017).

Alguns estudos têm apontado várias classes de solos com profundidades maiores que 50 cm, chegando até 1,2 m (ALMEIDA *et al.*, 2021; DAHER *et al.*, 2019; PRIETZEL *et al.*, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2019). Hipotetiza-se que o congelamento, nesses solos mais desenvolvidos, limita-se aos primeiros centímetros, favorecendo o deslocamento de comunidades microbianas para microhabitats mais favoráveis, onde se encontram mais protegidas dos efeitos do clima extremo na superfície do solo. Na subsuperfície desses solos, os efeitos dos ciclos de congelamento e descongelamento e das condições hidromórficas podem ser amenizados por temperaturas mais elevadas e maior aeração. Consequentemente, nesses locais a atividade microbiana e rizosférica intensificam a ciclagem da matéria orgânica.

Neste contexto, a retração das geleiras, a ocupação biótica e o desenvolvimento dos solos despertaram o interesse de pesquisadores sobre o desenvolvimento dos ecossistemas terrestres e a dinâmica da MOS em resposta aos efeitos do aquecimento global na Antártica. As pesquisas mais recentes sobre a dinâmica da MOS estão voltadas para temas como: ciclagem do carbono; emissões de CO₂; ocupação de plantas vasculares; comunidades microbianas; compostos orgânicos; recalitrância da MOS; e origem, degradação e mineralização da MOS (ALMEIDA *et al.*, 2021; BEYER *et al.*, 1995, 2000; BEYER; BÖLTER; SEPPELT, 2000; BEYER; WHITE; BÖLTER, 2001; DAHER *et al.*, 2019; ELBERLING *et al.*, 2006; HORROCKS *et al.*, 2020; PRIETZEL *et*

al., 2019; RAMPELOTTO *et al.*, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2019; THOMAZINI *et al.*, 2014, 2015, 2016a).

Embora haja um crescente estudo exploratório da dinâmica da MOS na Antártica, muitos destes temas são trabalhados separadamente. Desta maneira, revisa-se aqui, os efeitos do aquecimento global voltados para a Península Antártica e Antártica Marítima sobre processos envolvendo a dinâmica da MOS em aspectos tais como as participações de: C, N, P e demais nutrientes; dos componentes bióticos (vegetação e comunidade microbiana); das emissões de CO₂, da qualidade da MO e da estrutura do solo; em 46 perfis de 30 classes de solo distintos em artigos publicados em diferentes fontes (Tabela 1).

Tabela 1 – Autores, classes de solo e número de perfis utilizados na revisão

Autor	Classes de solo	Nº de perfis
Almeida et al. (2021)	Turbic Haplogelepts	6
	Typic Dystrogeleptsornithic - Ornithogenic	
	Typic Gelorthentsornithic- Ornithogenic	
	Typic Haplogeleptsornithic - Ornithogenic	
Beyer et al. (1995)	Fibri-Gelic Histosol	2
	Terri-Gelic Histosol	
Beyer et al. (2000)	Gleyie Turbic Cryosol	6
	Leptic Cryosol	
	Leptic Gelic Histosol	
	Leptic Turbic Cryosol	
Beyer et al. (2001)	Spodic Leptic Cryosol	3
	Gelic Podzol	
Daher et al. (2019)	Lithic Gelorthents	4
	Typic Dystrogelepts	
	Typic Gelorthents	
Prietzl et al. (2019)	Protic Cryosols (eutric, loamic)	5
	Protic Oxyaquic Cryosol (eutric, arenic)	
	Protic Tidalic Cryosol (eutric, fluvic, loamic)	
Rampelotto et al. (2015)	Não descrito	1
Rodrigues et al. (2019)	Ornithogenic Dystrogelepts	19
	Ornithogenic Gelorthents	
	Ornithogenic Haplogelepts	
	Ornithogenic Haploorthels	
	Ornithogenic Hemistels	
	Ornithogenic Saprístels	
	Ornithogenic Umbrorthels	
Typic Aquiturbels		

Autor	Classes de solo	N° de perfis
	Typic Gelorthents	
	Typic Haploturbels	
	Typic Humigelepts	
	Typic Umbriturbels	
	Typic Umbrorthels	

Fonte: elaborado pelo autor.

2.2 O deslocamento da comunidade microbiana para camadas mais profundas do solo

A vida microbiana é encontrada em quase todos os ambientes da Terra, em virtude de sua adaptação e versatilidade metabólica (TECON; OR, 2017). A presença de uma dada espécie no ambiente é determinada pela sua bagagem genética e condições ambientais (DOMMERCUES; BELSER; SCHMIDT, 1978; TECON; OR, 2017). A salinidade, o pH e a temperatura do solo são exemplos de fatores ambientais químicos e térmicos que afetam os microrganismos por interferirem no potencial hídrico, na biodisponibilidade de compostos químicos, na radiação, no albedo e umidade do solo (TECON; OR, 2017).

A temperatura é um fator determinante na distribuição, crescimento e atividade dos microrganismos no solo. Os microrganismos podem ser classificados conforme a temperatura ideal de crescimento, em hipertermófilos, termófilos, mesófilos, psicrotróficos e psicrófilos (BAIG; HOPTON, 1969; CARDOSO; ANDREOTE, 2016; FERNANDO *et al.*, 2007; INGRAHAM, 1958; NICOLAU, 2016; TECON; OR, 2017). Na Antártica, os microrganismos do solo são psicrófilos e a temperatura ótima para a distribuição e atividade desses organismos é de 15° C (MORITA, 1975), sendo descritas temperaturas ótimas para crescimento microbiano e mineralização da matéria orgânica entre 5 e 11 °C (KIM *et al.*, 2021; PIRES *et al.*, 2017; ZDANOWSKI; ZMUDA; ZWOLSKA, 2005). Entretanto, a maioria das paisagens da Antártica não possuem essa faixa de temperatura ideal para o desenvolvimento microbiano, o que não os impede de encontrar condições favoráveis em microhabitats capazes de reduzir os efeitos dos extremos climáticos (BÖLTER, 1995; SCHEFFERS; EDWARDS; DIOSMOS, 2014).

O gelo, a neve e a vegetação são capazes de promover o isolamento térmico do solo, criando microhabitats propícios à atividade microbiana. O acúmulo de neve fornece barreira térmica entre a superfície do solo e a atmosfera, promovendo forte efeito tampão (FERREIRA *et al.*, 2017; WILHELM; BOCKHEIM, 2016). Há uma correlação positiva entre a espessura da neve,

a temperatura e a umidade do solo (WILHELM; BOCKHEIM, 2016). Além disso, as camadas de musgos também promovem um efeito tampão, retardando as taxas de transmissão térmica entre a atmosfera e de solos subjacentes (KAAB, 2008; WILHELM; BOCKHEIM, 2016). Assim, as condições extremas de frio atmosférico e mesmo pela neve precipitada podem ser minimizadas nos primeiros centímetros do solo, proporcionando uma maior estabilidade térmica na subsuperfície (MOURA, 2010). Ainda sobre a estabilidade térmica, a condição estrutural do solo é outro fator relevante para condições favoráveis à comunidade microbiana, como as observadas na região oriental da Antártica, quando alguns filamentos de microrganismos foram encontrados na subsuperfície do solo, sendo associados à sua ocorrência à proteção exercida por cascalhos, amenizando os extremos climáticos (ALEKSEEV; ZVEREV; ABAKUMOV, 2020).

A camada superficial do solo está mais sujeita aos extremos climáticos tais como mudanças repentinas da temperatura atmosférica pelo contato direto com o ar, neve ou mesmo água do degelo. Esses fatores podem restringir a atividade microbiana. Restrições ao crescimento microbiano são observadas nos primeiros 3 cm do perfil do solo, onde há reduções na abundância e diversidade, e alterações na distribuição dos microrganismos (LAND *et al.*, 2006; LEPANE *et al.*, 2018; STOMEIO *et al.*, 2012). Nessas condições, microrganismos junto com a matéria orgânica podem se deslocar para a subsuperfície do solo por diferentes formas e processos de crioturbação ou pela circulação de água (percolação) ou produção ou soterramento de cascalhos (BEYER *et al.*, 1998; BEYER' *et al.*, 1998; BEYER *et al.*, 1999; BEYER; BÖLTER; SEPPELT, 2000; MERGELOV *et al.*, 2020). Entretanto, a maioria das comunidades microbianas se limitam a camada ativa do solo e não se deslocam para camadas muito profundas, em função das baixas tensões de oxigênio ocasionadas pelo encharcamento e das temperaturas muito frias na interface da camada ativa/permafrost (BOCKHEIM *et al.*, 2013; SIMAS *et al.*, 2008; STOMEIO *et al.*, 2012).

Nesse contexto, provavelmente, as comunidades microbianas do solo, na Península Antártica, apresentam maior atividade, a depender das condições ambientais (umidade, textura, cascalhos e plantas), sem muitas restrições de temperatura durante os ciclos de congelamento e descongelamento nas paisagens periglaciais. Grande parte da biota nas regiões polares possui mecanismos para sobreviver e metabolizar em temperaturas bem abaixo do ponto de congelamento. Alguns microrganismos alteraram o ponto de fusão de suas membranas, favorecendo maior fluidez, mesmo a temperaturas baixas (BAJERSKI; WAGNER;

MANGELSDORF, 2017; MCMEEKIN, 1993; NIELSEN; WALL, 2013; RAYMOND; FRITSEN, 2001; SINENSKY, 1974). Assim, após o congelamento, um “*pool*” lábil da matéria orgânica pode ocorrer em período de degelo, com microclima favorável, aumento da abundância e dispersão de microrganismos (AYRES *et al.*, 2010; BALL; VIRGINIA, 2014; BARRETT *et al.*, 2005).

Em estudo realizado por Zdanowski *et al.* (2005), observou-se que aumentos de temperatura impulsionaram o crescimento *in situ* da biomassa microbiana, em 42 dias, de 594 $\mu\text{g C g}^{-1}$ para 9101 $\mu\text{g C g}^{-1}$ de peso seco em guano de pinguins, o que pode resultar na intensificação na degradação da MOS (KIM *et al.*, 2021). Assim, os microhabitats servem como fonte de inóculo, garantindo a sobrevivência da comunidade microbiana durante o período de congelamento, favorecendo o crescimento populacional e a disseminação de microrganismos durante o período de descongelamento com o aumento da temperatura (NICHOLS; BOWMAN; GUEZENNEC, 2005; NOTTINGHAM *et al.*, 2019; ROSE *et al.*, 2009).

O isolamento térmico, a deposição da MO na superfície do solo e sua translocação para camadas inferiores podem estimular a biomassa e atividade microbiana em profundidade. Dessa maneira, baixas temperaturas externas ao solo e o translocamento da MO para camadas mais profundas podem não garantir a preservação da MOS na Península Antártica, como esperado para solos de outras regiões da Antártica (BEYER; WHITE; BÖLTER, 2001). Assim, microhabitats no solo com disponibilidade de MO, água, temperatura e ar são capazes de manter a atividade microbiana no ambiente Antártico. Tal condição contribui para o entendimento de que, na subsuperfície, são encontrados os maiores valores de atividade metabólica, riqueza bacteriana, diversidade e uniformidade quando comparada às camadas superficiais (Tabela 2).

Tabela 2 – Profundidade de ocorrência, contagem, número de heterótrofos, C mineralizado e índices de diversidade, riqueza e uniformidade de microrganismos na superfície e subsuperfície do solo

Prof. (cm)	Contagem (g ⁻¹ solos seco)	heterótrofos (g ⁻¹ solo seco)	Mineralização de C (g de c)	Diversidade	Riqueza	Uniformidade	Autores
0-3	$1,3 \times 10^8$	$3,7 \times 10^5$	-	-	-	-	Land et al. (2006)
3-15	$7,8 \times 10^7$	$8,6 \times 10^4$	-	-	-	-	
0-2	$2,3 \times 10^7$	$5,6 \times 10^3$	-	-	-	-	Land et al. (2006)
2-5	$<10^6$	$8,4 \times 10^3$	-	-	-	-	
0-2	$1,2 \times 10^8$	$3,6 \times 10^4$	-	-	-	-	Land et al. (2006)
5-10	$6,6 \times 10^7$	$2,1 \times 10^4$	-	-	-	-	
25-30	$3,6 \times 10^7$	$1,7 \times 10^3$	-	-	-	-	
0-1	$<10^6$	<10	-	-	-	-	Land et al. (2006)
1-5	$<10^6$	<10	-	-	-	-	
0-10	-	-	35,67	-	-	-	Pires et al. (2017)
10-20	-	-	73,70	-	-	-	
0-8	-	-	-	3,74	605,99	0,58	Rampelotto et al. (2015)
20-22	-	-	-	4,04	696,42	0,62	
35-40	-	-	-	4,73	821,02	0,70	
0-1	-	-	-	1,8	-	0,9	Stomeo et al. (2012)
2-5	-	-	-	2,5	-	0,9	
5-10	-	-	-	1,7	-	0,7	
10-15	-	-	-	3,1	-	0,9	
15-20	-	-	-	3,0	-	0,9	
0-1	-	-	-	1,7	-	0,9	Stomeo et al. (2012)
2-5	-	-	-	2,8	-	0,9	
5-10	-	-	-	2,2	-	0,9	
10-15	-	-	-	1,9	-	0,9	
15-20	-	-	-	1,9	-	0,8	
20-25	-	-	-	1,1	-	0,8	
25-30	-	-	-	1,9	-	0,8	

Fonte: elaborado pelo autor.

2.3 Solos mais desenvolvidos da Antártica possuem as melhores condições químicas para a atividade microbiana

Para essa abordagem, considerou-se que solos mais desenvolvidos são aqueles com 30 cm ou mais de profundidade. O compilamento de dados deu-se pela estratificação das quantidades de cada variável: C orgânico total, N total, P disponível, soma de bases, pH, água e condutividade elétrica, considerando os intervalos de profundidade do solo de 0-5; 5-10; 10-15; 15-20; 20-25; 25-30 e >30 cm. Os artigos foram triados tendo com critério o fato de apresentarem análise química do solo, em três profundidades e que se enquadrasse em algum dos intervalos de profundidade do solo colocados anteriormente. Todos os dados adquiridos foram convertidos em porcentagem (ex.: a porcentagem da variável = $((\text{TOC da camada} \times 100) / (\text{TOC de todas as camadas}))$) para padronizar a representatividade de cada variável (Tabela 3).

Tabela 3 – Exemplo de conversão de teores de C orgânico total (TOC) do perfil do solo em porcentagem

Profundidade (cm)	TOC (g kg ⁻¹)	TOC (%)
0-5	116	29,15
5-10	133	33,42
10-15	83	20,85
15-20	66	16,58

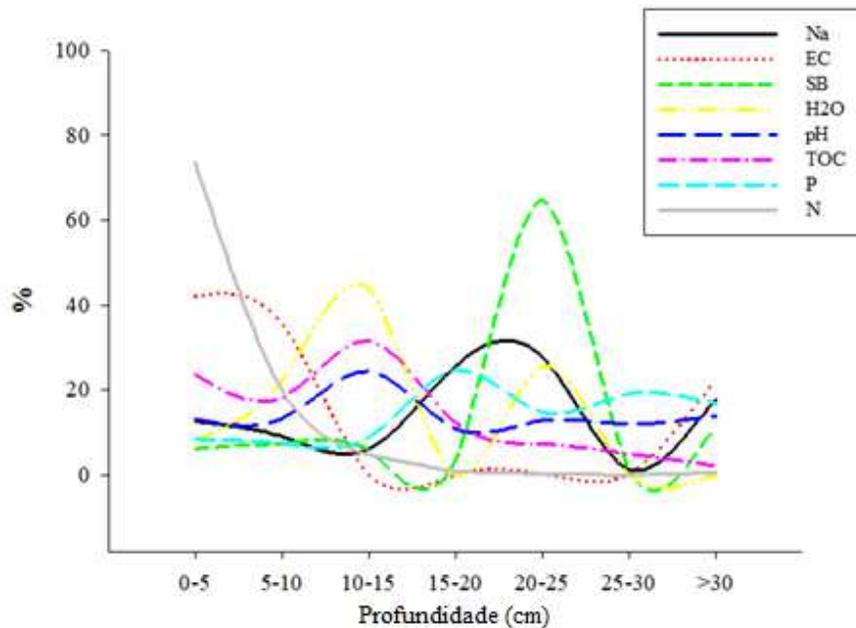
Fonte: Beyer et al. (2000)

Os resultados da estratificação dos dados levantados nas diferentes classes de solo e perfis (Tabela 1) resultaram em um perfil de solo modelo, o qual apresenta as principais características de um solo da Península Antártica e Antártica Marítima, o que pode ser considerado uma visão geral, independente da classe de solo. Observou-se valores máximos de teores de C de 74 g kg⁻¹ (DAHER *et al.*, 2019) e 144 g kg⁻¹ (CASTRO *et al.*, 2021) em superfície de solos ornitogênicos, sendo que 85,57% do TOC encontram-se nos primeiros 20 cm do solo e com maior abundância média (31%) na camada de 10-15 cm (Figura 1). Tais resultados podem ser associados à instabilidade física de alguns solos pouco estruturados da Antártica, os quais apresentam translocamento da matéria orgânica para subsuperfície, principalmente por processos de

crioturbação, lixiviação, podzolização e percolação dos solos (BEYER' *et al.*, 1998; BEYER *et al.*, 1998, 1999; BEYER; BÖLTER; SEPPELT, 2000; ŁACHACZ *et al.*, 2018; MERGELOV *et al.*, 2020; MOURA, 2010).

Constatou-se que a camada entre 10 e 15 cm foi a que menos apresentou restrições a atividade biótica, pois verificou-se a maior abundância de C, água, CTC, pH alcalino e menores teores de sais (Figura 1). A menor restrição favorece o crescimento microbiano e degradação da matéria orgânica lábil translocada da superfície para subsuperfície (BARRETT *et al.*, 2005; DE SOUZA CARVALHO *et al.*, 2013; PIRES *et al.*, 2017). Justificam-se também a maior abundância, diversidade, riqueza e uniformidade microbiana nas camadas de 5 a 20 cm de profundidade (LAND *et al.*, 2006; LEPANE *et al.*, 2018; PIRES *et al.*, 2017; RAMPELOTTO *et al.*, 2015; STOMEIO *et al.*, 2012). Tal condição pode refletir na redução da MOS e no aumento da sua recalcitrância em subsuperfície (BEYER *et al.*, 1998).

Figura 1 – Representatividade (%) de parâmetros de fertilidade dos solos da Antártica em profundidade (0-5 cm; 5-10 cm; 10-15cm; 15-20 cm; 20-25 cm; 25-30 cm e >30 cm. TOC: carbono orgânico total (TOC); N: nitrogênio; P: fósforo; SB: soma de bases; pH: potencial hidrogeniônico; Na: sódio; H₂O: água; CEC: capacidade de troca catiônica (CEC); EC: condutividade elétrica



Fonte: Almeida *et al.* (2021); Beyer *et al.* (1995, 2000, 2001); Daher *et al.* (2019); Elberling *et al.* (2006); Horrocks *et al.* (2020); Pires *et al.* (2017); Prietzel *et al.* (2019); Rampelotto *et al.* (2015); Rodrigues *et al.* (2019).

Nitrogênio (N) apresentou 93,70% de representatividade na profundidade de 0-10 cm, indicando baixa mobilidade para camadas mais profundas. Nos artigos revisados constatou-se máximo de 21,80 g kg⁻¹ em um Terri-Gelic Histosol (BEYER *et al.*, 2000) e 23 g kg⁻¹ em superfície de solos ornitogênicos (CASTRO *et al.*, 2021). Já nas demais classes de solo, os maiores teores foram de 0,42 g kg⁻¹ (PRIETZEL *et al.*, 2019) e 2 g kg⁻¹ (DAHER *et al.*, 2019), apoiando que a maioria dos solos da Antártica Marítima são pobres em N (exceto em solos ornitogênicos e Histosols), porém muito mais ricos que os dos Vales Secos da Antártica (LEE *et al.*, 2018; ORTIZ *et al.*, 2020). Assim, levando-se em consideração a baixa mobilidade de N para subsuperfície e os seus baixos teores, a população microbiana pode ser ativada pelos altos teores de P em profundidade, promovendo a degradação da matéria orgânica. O que foi observado na ilha King George, com altas emissões de CO₂ associadas a grupos de bactérias Gram-Positivas e disponibilidade de P. Tal fato leva a associação entre atividade microbiana e teores de P, quando se constatou que cerca de 75,48% de P encontra-se em camadas mais profundas (> 15 cm de profundidade) (Figura 1).

Os solos da Antártica possuem baixa atividade da água, principalmente em superfície, pois é perdida rapidamente por evaporação, sublimação e ablação impulsionada pela umidade atmosférica muito baixa, excepcionalmente nos Vales Secos da Antártica (BEYER *et al.*, 1999; CANNONE *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2020; ELBERLING *et al.*, 2006; FOUNTAIN *et al.*, 2010; HOPKINS *et al.*, 2006; STOMEIO *et al.*, 2012). Dessa maneira, em regiões como os Vales Secos, comunidades microbianas de camadas superficiais dependem da umidade efêmera (LEE *et al.*, 2018). Então, a maior disponibilidade de água nos solos da Península Antártica entre as camadas de 5-20 cm de profundidade (BEYER *et al.*, 1999; CHEN *et al.*, 2020; ELBERLING *et al.*, 2006) reforçam a hipótese de que a subsuperfície dos solos mais desenvolvidos pode favorecer uma maior produtividade biótica.

As perdas e ganhos da matéria orgânica em solos nus ou vegetados estão relacionados a atividade da água no solo, pois uma disponibilidade constante de água favorece estrutura de comunidade microbiana mais estável (CANNONE; GUGLIELMIN, 2009; KIM *et al.*, 2020). Além disso, os ambientes com solos melhor drenados e com maior atividade de água são importantes para uma biota mais ativa (BENAVENT-GONZÁLEZ; DELGADO-BAQUERIZO; FERNÁNDEZ-BRUN, 2019; CANNONE; GUGLIELMIN, 2009; RAMOS FERRARI, 2018),

impedindo a preservação dos insumos substanciais de TOC, minimizando o potencial de preservação anaeróbica (BEERLING, 2000).

Nos solos mais desenvolvidos, o tempo de permanência da matéria orgânica no solo pode ser reduzido pela maior abundância microbiana e colonização vegetal, onde, o aumento das interações vegetação-microrganismos-solo e a expansão das zonas rizosférica e rizoplano podem aumentar em até 100 vezes a densidade de microrganismos do solo quando comparada com o seu entorno (BARILLOT *et al.*, 2013). Assim, os solos mais desenvolvidos possibilitam temperaturas mais estáveis, positivas, até os 70 cm de profundidade, sendo que as maiores estavam na camada de 0-20 cm, chegando a 3,4 °C (DAHER *et al.*, 2019). Dessa maneira, a maior dinâmica da MOS torna o intemperismo químico mais expressivo, promovendo o desenvolvimento estrutural do solo (MOURA, 2010; TOSTES, 2011).

2.4 Desenvolvimento do solo e aumento da disponibilidade de água podem acelerar a degradação e mudanças na matéria orgânica da Península Antártica

Nas paisagens livres de gelo da Antártica, os solos sob condições de clima extremo, como nos Vales Secos, são poucos desenvolvidos e possuem diversidade biótica limitada (BARRETT *et al.*, 2006). Nessas condições, os solos podem atingir profundidades de 25 cm (GILICHINSKY *et al.*, 2007), sendo as comunidades microbianas controladas por variações no microclima do solo, matéria orgânica, umidade e salinidade (BARRETT *et al.*, 2006).

Nos Vales Secos, a água líquida é regulada pela temperatura e umidade relativa do ar (SEYBOLD; BALKS; HARMS, 2010), ficando disponível por três meses ao ano (STOMEIO *et al.*, 2012). Porém, supõe-se que seja suficiente para a atividade metabólica dos microrganismos na camada ativa do solo (STOMEIO *et al.*, 2012). A esse respeito (GARRIDO-BENAVENT *et al.*, 2020) concluíram que mudanças nas comunidades microbianas estavam associadas ao desenvolvimento do solo na Antártica Marítima. Horrocks *et al.* (2020) observaram que os solos mais úmidos continham maiores quantidade de biomarcadores microbianos em regiões da Antártica Marítima e Subantártica, permitindo inferir que solos mais desenvolvidos e úmidos aumentam a atividade microbiana na Antártica.

Na Península Antártica, devido sua localização geográfica, os solos podem ser mais desenvolvidos, pois as condições climáticas e as perturbações terrestres são diferenciadas das

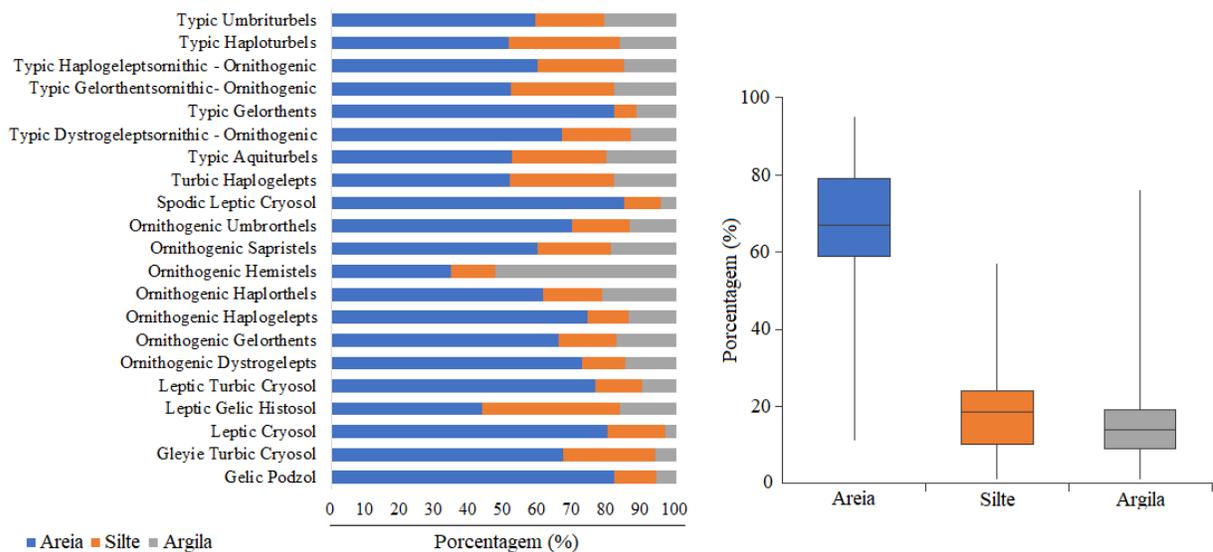
demais áreas continentais (BROOKS *et al.*, 2019), o que leva a um intemperismo muito mais intenso, formando solos com camada ativa mais profunda. Assim, sob condições climáticas menos extremas, a ocupação biológica é alta, quando comparados aos vales secos e a Antártica continental (BERGSTROM; CONVEY; HUISKES, 2006; BEYER *et al.*, 1999), pois a água está disponível com o derretimento das geleiras e do permafrost (BENTLEY ET AL., 2009; COOK *et al.*, 2005).

O período de degelo maior, além de propiciar uma camada ativa mais profunda, permite maior absorção de água, como observado na floresta boreal (FISHER *et al.*, 2016). Sugere-se, então, que o desenvolvimento, a drenagem, a aeração e a capacidade de disponibilização de água e nutrientes aumentam a atividade microbiana, afetando o tempo de permanência do carbono no solo (ELBERLING *et al.*, 2006) e, provavelmente, ocasionando mudanças na matéria orgânica do solo.

2.5 Proteção física da matéria orgânica do solo

Como visto nos tópicos anteriores, os solos mais desenvolvidos e com maior camada ativa, de maneira geral, parecem não oferecer proteção química, térmica ou hídrica em subsuperfície para a MOS, ficando mais acessível às comunidades microbianas. A proteção física poderia, então, dar maior estabilidade a matéria orgânica do solo, favorecendo o seu aumento. A argila representa uma fração granulométrica do solo que promove a maior proteção física da MO, o que não é muito comum nos solos da Antártica, que, em sua grande maioria, apresentam baixos teores de argila (ŁACHACZ *et al.*, 2018), logo, também, não oferecem uma boa proteção física para a matéria orgânica (DE SOUZA CARVALHO *et al.*, 2013) (Figura 2). Assim, a menor proteção química, física, térmica e hídrica, e o longo tempo que o solo leva para se desenvolver, podem refletir na degradação da matéria orgânica e aumentar a recalcitrância desta em subsuperfície.

Figura 2 – Distribuição granulométrica das partículas de areia, silte e argila de solos da Antártica.



Fonte: Almeida *et al.* (2021); Beyer *et al.* (2001, 2000a, 1998); Daher *et al.* (2019); Prietzel *et al.* (2019); Rodrigues *et al.* (2019).

2.6 Rotatividade da matéria orgânica: textura do solo e ocupação vegetal

Um dos maiores impulsionadores da redução do tempo de permanência da matéria orgânica no solo trata-se da ocupação e/ou sucessão da cobertura vegetal (DEYN *et al.*, 2008; CARBONE; TRUMBORE, 2007). A vegetação permite maior estabilidade física e térmica do solo (ALMEIDA *et al.*, 2014; GUGLIELMIN *et al.*, 2014), além de formar elo de transferência de C entre o solo e a atmosfera (relação solo-planta-atmosfera), atuando como fonte ou dreno de CO₂ (BRÜGGEMANN *et al.*, 2011). Nesse aspecto, a Península Antártica passa por dois ciclos de C associados ao desenvolvimento do solo e o tipo de vegetação.

O primeiro ciclo ocorre em solos menos desenvolvidos, de textura arenosa (geralmente acima de 70% de areia) e/ou hidromórficos, nos quais a ocupação vegetal se dá por plantas não vasculares, criptógamas e criptoendolíticas (Figura 3). A cobertura de musgos está fortemente relacionada à quantidade de C orgânico, água e teor de nutrientes no solo (BRAGAZZA *et al.*, 2019). Nessas condições, a vegetação funciona como dreno de CO₂, além de possibilitar o maior acúmulo da MOS pelo maior tempo de permanência no solo (BEYER' *et al.*, 1998; LONGTON, 1979; THOMAZINI *et al.*, 2016b).

Prevê-se que o avanço do intemperismo nessas condições promoverá a substituição de plantas não vasculares por vasculares, com consequente aumento da rizosfera, biomassa microbiana, da respiração do solo e das emissões de CO₂. Neste ciclo, a vegetação vascular atua mais como fonte do que dreno de CO₂. Ferrari et al. (2023 - dados não publicados) analisaram as emissões de CO₂ em sítios com e sem vegetação (com plantas não vasculares e vasculares) e encontraram maiores amplitudes de emissões de CO₂ em áreas ocupadas por *D. antarctica*, estando associado a P e biomassa microbiana. Assim, solos ornitogênicos podem ser uma grande fonte de CO₂, visto que são ricos em C, N e P, além de serem frequentemente ocupados por *D. antarctica* (BEYER et al., 1999; ORTIZ et al., 2020), detentora do maior sistema radicular da Antártica.

A presença da vegetação pode ser considerada fator que aumenta a atividade enzimática do solo em comparação com as áreas desnudas (BARILLOT et al., 2013; BENAVENT-GONZÁLEZ et al., 2018). Nos Vales Secos da Antártica, a ocupação de musgos foi associada à maior biomassa microbiana, teores de C e a atividade total das enzimas hidrolíticas, com maior investimento em atividade enzimática com o aumento da disponibilidade de N e P (BRAGAZZA et al., 2019). Além disso, a atividade enzimática do solo é altamente dependente da temperatura e da umidade (BROOKES, 1995), ambos os fatores estão diretamente associados às características da vegetação. Solos vegetados podem atingir temperaturas acima de 10°C em comparação com a temperatura do ar na Antártica (SCHROETER; GREEN, 2011). Esse aumento da temperatura favorece a maior atividade da água, degradação e mineralização da MOS, além da ciclagem de nutrientes. Neste contexto, sugere-se que a espécie *D. antarctica* promova a intensificação da respiração do solo, pois há uma maior atuação da rizosfera desta espécie quando comparada com vegetação inferior, estimulando a degradação da matéria orgânica (HILL et al., 2019) com alta taxa de rotatividade.

2.7 Degradação da matéria orgânica do solo

Na Península Antártica, os principais meios de deposição de matéria orgânica no solo são via guano de aves (principalmente de pinguins), acúmulo em lagos e biomassa vegetal (principalmente musgos, algas e líquens) (BURKINS et al., 2000; CANNONE; GUGLIELMIN, 2009; HOPKINS et al., 2006, 2008, 2009; MOORHEAD et al., 1999, 2003). Porém, uma parcela

relevante da entrada de matéria orgânica no solo é praticamente cessada após o abandono das pinguineiras ou soterramento dos lagos e da vegetação (ELBERLING *et al.*, 2006; HOPKINS *et al.*, 2008; MICHEL *et al.*, 2006; TATUR; MYRCHA; NIEGODZISZ, 1997). Neste contexto, a entrada da MO fica mais controlada pela dinâmica eólica e ciclo hidrológico. Com isso, a MOS torna-se um recurso limitado (redução da entrada de MO) e mais disponível para degradação que se intensifica com o desenvolvimento do solo, ocupação vegetal e aquecimento global (temperaturas cada vez mais adequadas para a biomassa microbiana) (Ferrari *et al.*, 2023 - dados não publicados) (HILL *et al.*, 2019; THOMAZINI *et al.*, 2016b).

O declínio da matéria orgânica pode ocorrer devido ao aumento da degradação, verificado a partir da matéria orgânica incubada (BARRETT *et al.*, 2005; PIRES *et al.*, 2017). Estima-se taxas de 42% de perdas de MOS num período entre 50 e 73 anos no ambiente Antártico (HOPKINS *et al.*, 2009) e uma taxa de 51% quando a temperatura está em torno de 8°C (KIM *et al.*, 2021). Nessa perspectiva, os efeitos das mudanças climáticas sobre a matéria orgânica dos solos da Antártica levarão pelo menos 100 anos para ocorrer (HOPKINS *et al.*, 2009, 2020).

Em campo, evidências já apontavam para o declínio da matéria orgânica do solo há 35 anos (DAVIS, 1986; TEARLE, 1987). A exemplo de solos não ornitogênicos, onde os musgos, líquens, algas e bactéria autotróficas são os principais meios de entrada de matéria orgânica, influenciando a deposição de C, P e S (BEYER; WHITE; BÖLTER, 2001; EIDEN, 2009; PRIETZEL *et al.*, 2019; TAHON *et al.*, 2016). Os estudos estimavam que, a cada ano, os ciclos de congelamento e o descongelamento induzem a liberação de 10 vezes mais matéria orgânica total das plantas criptógamas para a microbiota do solo, quando comparado a que fica disponível a cada ano com a decomposição do material morto na subsuperfície (DAVIS, 1986; TEARLE, 1987).

Recentemente, Hill *et al.* (2019) constataram que a degradação da MOS, composta por musgos pouco decompostos que frequentemente ultrapassam 1 metro de profundidade e permaneceram sem decomposição por milênios, torna-se cada vez mais biodisponível com o aumento da temperatura do ar e o degelo. Essa condição leva à perda da MOS devido à penetração profunda das raízes da *D. antarctica* colonizadas por fungos, permitindo a exploração de nutrientes antigos da MOS. A colonização dos solos por fungos e plantas vasculares pode levar a grande eficiência na degradação e mineralização da MOS, independente do tempo de armazenamento. Em estudo recente, verificou-se essa eficiência na respiração de C antigo, com 1.200 anos, por fungos

saprofíticos membros de Helotiales (NEWSHAM *et al.*, 2018). Logo prevê-se que a colonização de plantas vasculares e fungos explorará a MOS de diferentes tempos de armazenamento.

2.8 Respiração do solo e perdas de C por emissões de CO²

A respiração do solo na Península Antártica tem aumentado nas últimas décadas, promovendo perdas de C do solo com o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) (DE SOUZA CARVALHO *et al.*, 2013; HORROCKS *et al.*, 2020; PIRES *et al.*, 2017). Esse aumento no percentual de emissões está relacionado às elevações de temperatura do solo em 10°C, verificadas em campo e experimentos de laboratórios (DE SOUZA CARVALHO *et al.*, 2013; HORROCKS *et al.*, 2020; PIRES *et al.*, 2017). As emissões de CO₂ ocorrem, principalmente em áreas vegetadas, onde a cobertura vegetal tem papel importante no aumento de temperatura e amortecimento térmico do solo (WILHELM; BOCKHEIM, 2016). Um exemplo desse processo são as áreas cobertas com a espécie *Deschampsia antarctica* que elevou em 230% as emissões de CO₂ (HOPKINS *et al.*, 2020). Nessa perspectiva, parece provável que, as mudanças na MOS da Península Antártica ocorram muito mais rápido do que o previsto frente ao aumento da temperatura, que atingiu 18.3°C em uma ilha da Península Antártica em 2020 (FRANCELINO *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2021) e o crescente número de filos microbianos encontrados nos solos da Antártica (LAMBRECHTS *et al.*, 2019).

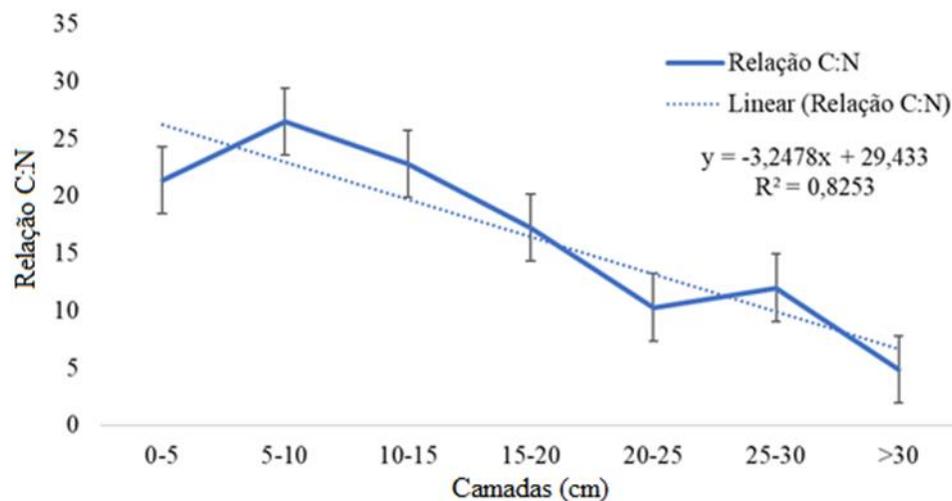
Dentre os solos antárticos, os ornitogênicos e os Histosols são potenciais fontes de CO₂. Em geral, os solos da Antártica Marítima apresentam ampla variação de teores de C, entre 1,06% e 26,4% (RODRIGUES *et al.*, 2019), porém os ornitogênicos e Histosols são os mais ricos em matéria orgânica com teores de C entre 100 e 300 mg g⁻¹ em algumas camadas (BEYER *et al.*, 2000; BEYER; WHITE; BÖLTER, 2001). A matéria orgânica desses solos é rica em P e N e podem gerar elevadas emissões de CO₂ (praticamente o dobro quando comparado a outros solos antárticos) (ORTIZ *et al.*, 2020; THOMAZINI *et al.*, 2016a) por fosfatase, nitrogenase e o enraizamento de *D. antarctica* estimulando a respiração do solo (DE SOUZA CARVALHO *et al.*, 2013; ORTIZ *et al.*, 2020; THOMAZINI *et al.*, 2015, 2016b). Os estudos em solos ornitogênicos apontam para emissões entre 160 à 654 mg m⁻² h⁻¹ (LA SCALA *et al.*, 2010; MENDONA *et al.*, 2011; THOMAZINI *et al.*, 2014, 2015, 2016b) e um máxima de 786 mg m⁻² h⁻¹ em Histosols (Ferrari *et al.*, 2023 - dados não publicados). Essas elevadas emissões em solos ornitogênicos e

Histosols estão dentro da variação observada em outros continentes como: áreas de vegetação natural, gramíneas e mudanças de cobertura vegetal, que variam de 10,7 a 2297,6 mg m⁻²h⁻¹ (LI *et al.*, 2009; WEI *et al.*, 2012; WERE *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2014; YU *et al.*, 2020), sugerindo que as emissões de CO₂ na Península Antártica estão dentro dos padrões dos ecossistemas terrestres globais.

2.9 Relação C:N pode ser indicadora de resistência à degradação ou estabilidade da MOS na Antártica?

Estudos mostraram que a matéria orgânica de diferentes classes de solo e profundidades é de alta qualidade na Antártica, pois apresentam relação C: N média de 18,61 (Tabela 4/ Tabela suplementar: TS1). Tal condição favorece a degradação dessa matéria orgânica, aumentando as emissões de CO₂ e a mineralização de nutrientes, o que pode ser impulsionado pela vegetação (vascular), impactando a produtividade primária da Antártica (MENGEL, 1996; NANDWA, 2001). Os dados publicados revelam que solos mais desenvolvidos possuem maior relação C:N na camada de 0-15 cm com valores médios entre 21 e 26, declinando para 17 aos 15-20 cm, 10 à 12 entre 20 e 30 cm e 4,87 para camada maiores que 30 cm (Figura 4).

Figura 4 - Relação C:N média em camadas dos solos da Antártica.



Fonte: Almeida *et al.* (2021); Beyer *et al.* (1995); Beyer *et al.* (2000); Beyer *et al.* (2001); Daher *et al.* (2019); Prietzel *et al.* (2019) e Rodrigues *et al.* (2019) (Tabela suplementar: TS1).

De maneira geral, os solos mais desenvolvidos possuem relação C:N de média a baixa (ALMEIDA *et al.*, 2021; BEYER *et al.*, 1995, 2000; BEYER; BÖLTER; SEPPELT, 2000; BEYER; WHITE; BÖLTER, 2001; DAHER *et al.*, 2019; PRIETZEL *et al.*, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2019), pois são mais frequentados por animais, aumentando a entrada de compostos nitrogenados no solo, reduzindo a relação C:N (BEYER *et al.*, 1999; ŁACHACZ *et al.*, 2018; ORTIZ *et al.*, 2020). Em solos ornitogênicos, a podzolização também promove o translocamento de ácidos orgânicos, carboidratos não humificados e N para a subsuperfície, reduzindo a relação C:N (BEYER *et al.*, 1997).

Embora algumas áreas ou perfis de solos apresentem alta relação C:N (TS1), não se deve julgar a recalcitrância ou estabilidade da MOS somente pela proporção de C. Os solos da Antártica são, de maneira geral, pobres em N, principalmente os solos não-ornitogênicos (ORTIZ *et al.*, 2020) e ricos em compostos alifáticos (ABAKUMOV, 2017; ABAKUMOV *et al.*, 2022; ABAKUMOV; ALEKSEEV, 2018b), resultando em alguns casos em alta relação C:N. Tal comportamento foi observado em solos estudados por Elberling *et al.* (2006) e Daher *et al.* (2019), tendo sido constatado valores de relação C:N de até 104, o que não significa que sejam solos com MO mais recalcitrante ou estável. Nesse sentido, a técnica de ressonância magnética nuclear tem sido mais eficiente para resultados de aromaticidade e inferência na recalcitrância da MOS (ABAKUMOV, 2017; ABAKUMOV *et al.*, 2022; ABAKUMOV; ALEKSEEV, 2018b; BEYER *et al.*, 1995).

2.10 Considerações

As frequentes descrições em artigos sobre aumento da biomassa microbiana, emissão de CO₂, degradação e mineralização da matéria orgânica do solo apontam para o aumento da temperatura, da umidade e drenagem do solo, e da ocupação dos solos mais desenvolvidos por *Deschampsia antarctica*, onde a matéria orgânica é desprotegida fisicamente (domínio arenoso), formando evidências de padrão de perdas de C do solo na Península Antártica.

Os estudos sugerem pools de emissões de CO₂ até a temperatura ambiente do solo da Antártica atingir o grau ótimo (15°C) de desenvolvimento de microrganismos psicrofilos termotolerantes. Os solos ornitogênicos e Histosols emitiram mais CO₂, devido a maior quantidade e qualidade da matéria orgânica de baixa aromaticidade. Assim, até o presente momento, a Península Antártica possui tendências a exercer muito mais o papel de fonte de C para a atmosfera do que dreno com o avanço do aquecimento global.

A compilação de dados permitiu identificar a profundidade de 10-15 cm como o microhabitat do solo capaz de ofertar as melhores condições ambientais e de recursos para a biota do solo, em especial as comunidades microbianas. Assim, o translocamento da matéria orgânica para o subsolo não garante sua preservação e nem estabilidade, principalmente sem a proteção física do solo.

A espécie *Deschampsia antarctica* está vinculada, na literatura revisada, como possível controladora da comunidade microbiana, impulsionando a degradação da matéria orgânica e as emissões de C, aumentando a rotatividade, enquanto as comunidades mistas e a vegetação criptoendolítica atuam como dreno de C.

2.11 Críticas/Lacunas:

Os dados publicados sobre matéria orgânica da Antártica são escassos, limitando as previsões futuras da dinâmica da MOS.

Os estudos publicados fazem análises em camadas do solo altamente heterogêneas em relação à espessura da camada, o que dificulta análises e construção de gráficos de meta-análise.

Pesquisas abrangendo os estoques de C e o efeito da rizosfera precisam ser implantados na Antártica para estudos mais precisos da dinâmica da MOS.

2.12 Material suplementar

Tabela 4 – Tabela suplementar 1 (TS1): Relação C:N em solos da Antártica em diferentes profundidades

Autor	Solo	Profundidade (cm)	Relação C:N
Beyer et al. (1995)	Terri-Gelic Histosol	3	19,00
		8	9,00
		16	9,00
		28	12,00
Beyer et al. (1995)	Fibri-Gelic Histosol	1	20,00
		8	26,00
		18	18,00
Beyer et al. (2000)	Spodic Leptic Cryosol	0-13	11,80
		13-15	29,80
Beyer et al. (2000)	Leptic Gelic Histosol	0-2	18,80
		2-4	15,20
		4-15	13,70
		15-18	12,00
		18-22	35,80
Beyer et al. (2000)	Leptic Cryosol	0-2	10,90
		2-6	14,30
		6-9	16,80
		9-36	22,70
Beyer et al. (2000)	Gleyie Turbic Cryosol	0-2	6,30
		2-13	10,10
		13-35	29,70
Beyer et al. (2000)	Leptic Turbic Cryosol	0-5	17,30
		5-10	23,90
		10-15	26,30
		15-20	23,60
Beyer et al. (2000)	Leptic Cryosol	0-2	15,50
		2-5	12,50
Beyer et al. (2000)	Leptic Cryosol	0-2	5,60
		2-10	11,10
Beyer et al. (2000)	Leptic Cryosol	0-6	10,20
		6-9	9,40
		9-16	8,30
Beyer et al. (2001)	Gelic Podzol	0-2,5	10,70
		-10	15,30

Autor	Solo	Profundidade (cm)	Relação C:N
		-20	9,80
		-25	10,30
Beyer et al. (2001)	Gelic Podzol	0-4	13,40
		-7	13,00
		-20	10,90
Beyer et al. (2001)	Gelic Podzol	-9	28,90
		-11	10,70
		-16	7,80
		-35	7,30
		-71	2,30
Daher et al. (2019)	Typic Gelorthents	0-5	4,50
		5-20	3,00
		20-45	0,50
		45-60	1,00
		60-100	1,00
Daher et al. (2019)	Lithic Gelorthents	0-10	74,00
		10-17	42,00
		17-20	5,00
Daher et al. (2019)	Typic Dystrogelepts	0-3	32,00
		3-10	22,00
		10-20	29,00
		20-38	24,00
		38-70	16,00
Daher et al. (2019)	Typic Gelorthents	0-3	2,00
		3-10	3,00
		10-30	1,00
		30-70	1,00
Elberling et al. (2006)	-	0-1	44,44
		1-4,5	69,05
		4,5-8	90,00
Elberling et al. (2006)	-	0-1	48,21
		1-4,5	71,93
		4,5-8	104,88
Elberling et al. (2006)	-	0-1	87,76
		1-4,5	61,11
		4,5-8	59,72
Elberling et al. (2006)	-	0-1	14,11
		1-4,5	17,86
		4,5-8	35,82

Autor	Solo	Profundidade (cm)	Relação C:N
Elberling et al. (2006)	-	0-1	14,30
		1-4,5	21,91
		4,5-8	18,73
Elberling et al. (2006)	-	0-1	23,55
		1-4,5	42,26
		4,5-8	52,60
Elberling et al. (2006)	-	0-1	12,21
		1-4,5	12,24
		4,5-8	13,00
Elberling et al. (2006)	-	0-1	9,16
		1-4,5	9,03
		4,5-8	9,06
Prietzl et al. (2019)	Protic Cryosols (eutric, loamic)	0-5	7,78
		5-10	8,84
		10-20	7,88
		20-50	12,03
		>50	10,17
Prietzl et al. (2019)	Protic Cryosols (eutric, loamic)	0-5	5,92
		5-10	5,64
		10-20	5,10
		>20	4,17
Prietzl et al. (2019)	Protic Cryosols (eutric, loamic)	0-5	3,00
		5-10	2,86
		10-20	3,00
		20-50	2,59
		>50	2,67
Prietzl et al. (2019)	Protic Oxyaquic Cryosol (eutric, arenic)	0-5	3,61
		5-10	4,39
		10-20	2,61
Prietzl et al. (2019)	Protic Tidalic Cryosol (eutric, fluvic, loamic)	0-5	3,50
		5-10	4,26
		10-20	3,82

Fonte: elaborado pelo autor.

3 TENDÊNCIAS BIOQUÍMICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO ANTÁRTICO EM RESPOSTA À RETRAÇÃO DAS GELEIRAS: IMPLICAÇÕES PARA O CICLO DO CARBONO

Resumo: Retrações de geleiras estão aumentando na Antártica nas últimas décadas, expondo rochas, com o desenvolvimento de solos. Estudos voltados para mudanças na composição bioquímica da matéria orgânica são fundamentais para compreender mecanismos da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e a estabilidade dos reservatórios de C. Com isso, objetivou-se analisar mudanças na composição bioquímica da MOS e associá-las com propriedades pedogenéticas e biológicas (sobretudo a ocupação vegetal) e com os teores de C e N em solos expostos nos recuos das geleiras da Antártica Marítima. O estudo foi realizado na Área Especialmente protegida da ilha King George (ASPA 128), da Antártica Marítima. A coleta de amostras de solo e vegetação foi realizada em sítios, delimitados por processos geomorfológicos, altitude, distância da geleira e cobertura vegetal. O solo foi analisado quanto a características físicas e químicas, além de fracionado em matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) e nestas determinados os teores de C (Walkey-black) e N (Kjeldahl) e a composição molecular orgânica, por termoquimólise. Os resultados revelaram a importância de cascalhos e calhaus para a fixação de plantas em sítios mais distantes das geleiras, as quais promoveram o aumento dos teores de C e N, no entanto não significativos. Os solos nus são abundantes em lipídios (~100%), rapidamente reduzidos (até 80% na MOAM) com a ocupação vegetal, promovendo o aumento de carboidratos, biopolímeros, terpenos, além da aromaticidade (entre 30-40%). Tais resultados tornam evidentes também o papel das comunidades de plantas inferiores nas mudanças bioquímicas da matéria orgânica. Conclui-se que as comunidades criptógamas e criptoendolíticas são os principais agentes transformadoras da matéria orgânica e dos aumentos dos teores de C em solos não-ornitogênicos da ASPA 128, Antártica Marítima.

Palavras-chave: aromaticidade, comunidades vegetais, acidez do solo e aquecimento global

Abstract: Glacier retreats have been increasing in Antarctica in recent decades, exposing rocks and leading to soil development. Studies focused on changes in the biochemical composition of organic matter are crucial for understanding the dynamics of soil organic matter (SOM) and the stability of carbon reservoirs. Thus, the aim of this study was to analyze changes in the biochemical composition of SOM and associate them with pedogenetic and biological properties (particularly vegetation cover) as well as with C and N content in soils exposed due to glacier retreats in the Antarctic Maritime region. The study was conducted in the Specially Protected Area (ASPA 128) on King George Island, Antarctic Maritime region. Soil and vegetation samples were collected from sites delineated based on geomorphological processes, altitude, distance from the glacier, and vegetation cover. The soil was analyzed for physical and chemical characteristics, and it was fractionated into particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MOM). Carbon (determined by Walkey-black method) and nitrogen (measured by Kjeldahl method) contents were determined, along with the molecular organic composition through thermochemolysis. The results revealed the significance of gravel and pebbles in supporting plant growth in sites farther from the glaciers, leading to increased C and N content, although not statistically significant. Naked soils were abundant in lipids (~100%), which were rapidly reduced (up to 80% in MOM) with vegetation occupation, resulting in increased carbohydrates, biopolymers, terpenes, and aromaticity (between 30-40%). These findings also underscore the role of lower plant communities in the biochemical changes of organic matter. In conclusion, cryptogamic and cryptoendolithic communities are the primary agents responsible for transforming organic matter and increasing C content in non-ornithogenic soils of ASPA 128, Antarctic Maritime region.

Key words: aromaticity, plant communities, soil acidity, and global warming

3.1 Introdução

A Antártica possui menos de 1 % de áreas livre de gelo (BROOKS *et al.*, 2019; TERAUDS; LEE, 2016). A maior região continental exposta está localizada na Península Antártica e Antártica Marítima, com 87 % das geleiras em processo de retração (BENTLEY *et al.*, 2009; BROOKS *et al.*, 2019; COOK *et al.*, 2005; TERAUDS; LEE, 2016). A exposição de rochas nessa região possibilitou o surgimento de uma variedade de solos e a maior ocupação por comunidades biológicas (plantas, microrganismos e animais), intensificando o intemperismo do solo, quando comparado a outras regiões do continente, como os vales secos (ALMEIDA *et al.*, 2021; BERGSTROM; CONVEY; HUISKES, 2006; BEYER' *et al.*, 1998; BEYER *et al.*, 1998, 2000; BEYER; BÖLTER; SEPPELT, 2000; BEYER; WHITE; BÖLTER, 2001; BROOKS *et al.*, 2019; DAHER *et al.*, 2019; PRIETZEL *et al.*, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2019). Tal condição pode ter implicações sobre a dinâmica do carbono (C) nos solos dos ecossistemas não-glaciais.

As retrações das geleiras têm gerado preocupação sobre a exposição da matéria orgânica à degradação microbiana e sua estabilidade (ABAKUMOV, 2017; HILL *et al.*, 2019). Esse processo, pode afetar negativamente o balanço de C do solo frente ao aquecimento global. O estabelecimento de balanço positivo de C nessas áreas é incerto em função da qualidade da matéria orgânica do solo (MOS), derivada de plantas não lignificadas (musgos, líquens, microalgas e plantas superiores) (BURKINS *et al.*, 2000; HOPKINS *et al.*, 2006, 2009) e muito mais abundantes em carboidratos e compostos alifáticos do que em compostos aromáticos (20% a 30%) (ABAKUMOV, 2017; ABAKUMOV *et al.*, 2022; ABAKUMOV; ALEKSEEV, 2018b; BEYER *et al.*, 1995). Com o aumento da temperatura e distanciamento das geleiras, Hopkins *et al.* (2009), Horrocks *et al.* (2020) e Kim *et al.* (2021) sugerem a ocorrência de perdas de aproximadamente 42-50% da MOS no intervalo de 50 à 90 anos, com o período de permanência média do C no solo de 6-10 anos (ciclo do C).

O intemperismo dos solos na Antártica é outro fator importante para o balanço de C, pois, com o aumento da camada ativa, a MOS perde o efeito preservativo da geleira e do permafrost, impulsionando sua degradação. A acidificação, inerente ao intemperismo dos solos, além da adição ornitogênica de resíduos orgânicos como o guano de pinguim, frequentemente verificada em solos sulfatados ou em áreas com fosfatos de alumínio (ALMEIDA *et al.*, 2021; DO VALE LOPES *et al.*, 2019; FERRARI *et al.*, 2021; FORTES RODRIGUES *et al.*, 2021; MAROSTICA *et al.*, 2022;

MENDONÇA *et al.*, 2013; SIMAS *et al.*, 2007) favorecem a ocupação vegetal mais densa (FERRARI *et al.*, 2021). A ocupação vegetal, por sua vez, intensifica ainda mais os processos pedogênicos concomitantemente à acidez e ao aquecimento do solo (DO VALE LOPES *et al.*, 2019; SIQUEIRA *et al.*, 2022). Dessa maneira, plantas superiores podem ampliar a intensidade de degradação da MOS (HILL *et al.*, 2019) e reduzir os reservatórios de C.

Os mecanismos de estabilização da MOS são três: (i) proteção por silte e argila; (ii) proteção física por microagregados; e (iii) pela recalcitrância de alguns compostos orgânicos da MOS (SIX *et al.*, 2002). As mudanças bioquímicas da MOS são relevantes para estudos ecossistêmicos terrestres não-glaciais, assim como dos reservatórios de C de solos em desenvolvimento na Antártica, ambos em resposta ao aquecimento global. Esses estudos são escassos, especialmente quando se associam mudanças na composição bioquímica da MOS em relação à retração das geleiras e do tempo de exposição da superfície.

Assim, entender como a composição bioquímica da MOS é alterada com a retração das geleiras ajuda a compreender os processos dinâmicos do ciclo do C na Antártica sob efeitos do aquecimento global. Hipotetiza-se que a retração das geleiras e a ocupação vegetal promova a formação de compostos recalcitrantes da matéria orgânica e aumente os reservatórios de C. Com isso, objetivou-se analisar mudanças na bioquímica da MOS e associá-las com propriedades pedogenéticas e biológicas (sobretudo a ocupação vegetal) e os teores de C e N de solos com a superfície exposta pelos recuos das geleiras da ilha King George, Antártica Marítima.

3.2 Materiais e método

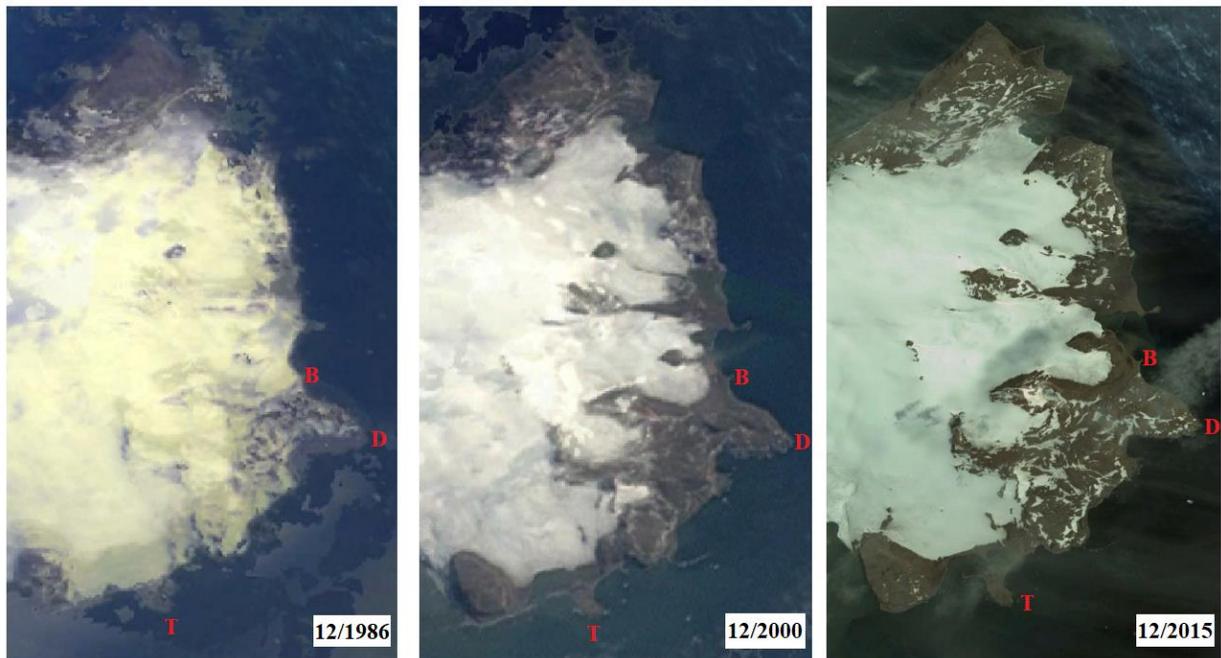
3.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Área Especialmente Protegida da Antártica (ASPA 128) da ilha de King George, na Antártica Marítima, criada para proteção de fauna (colônias de reprodução e locais de descanso para pinguins, pássaros voadores e mamíferos pinípedes) e flora (comunidades de musgos, líquens e gramíneas) (Instytut Biochemii i Biofizyki PAN, 2023). Os dados meteorológicos de médias anuais registrados para a ASPA 128 no período de 2013-2017 foram: temperatura do ar de -1.7°C ; umidade relativa do ar de 78,1%; radiação solar de $2934,6 \text{ Mj m}^{-2}$; e precipitação de 499,8 mm (PLENZLER *et al.* 2019). Os dados meteorológicos variam ao longo do ano a depender do período sazonal, onde as médias para o período de estudo (verão - mês de

fevereiro) foram de: temperatura do ar de 1,6°C; umidade relativa do ar de 79,7 %; radiação solar de 336.3 Mj m⁻²; e precipitação de 31,8 mm (PLENZLER et al. 2019). As coletas de dados foram conduzidas em sítios dos recuos das geleiras de Baranowski (62° 12,358'S - 58° 26,422'O), Demay Point (62° 12,690'S - 58° 25,992'O) e Telephone Point (62° 14,008'S - 58° 28,329'O) (Figura 2).

As retrações das geleiras na ASPA 128 ocorreram antes de 1940 e intensificaram após 1950 (ANGIEL; DAŃSKI, 2012) . As retrações e tempos dos recuos são Baranowski (274 m e 44 anos [1979-2023]), Telephone Point (900 m e ano não estimado) e Demay Point estimados (1800 m e 67 anos). Telephone Point e Demay Point são anteriores a 1979 (PUDEŁKO *et al.*, 2018; SZIŁO; BIALIK, 2018). Acredita-se que, devido à sua altitude, o recuo Demay Point seja o recuo com maior tempo de exposição do solo, no caso, 67 anos (1956-2023) (PASIK *et al.*, 2021), deglaciando ao mesmo tempo que o recuo *Stenhouse Bluff* na mesma ilha King George (NOBLE, 1965). Demay Point passa por deglaciação mais rápida que os demais recuos analisados, tornando seus sítios mais distantes e menos influenciados pela geleira (Figura 5).

Figura 5 – Imagens das retrações das geleiras Demay Point (D), Baranowski (B) e Telephone Point (T) no mês de dezembro do ano de 1986 à 2015.

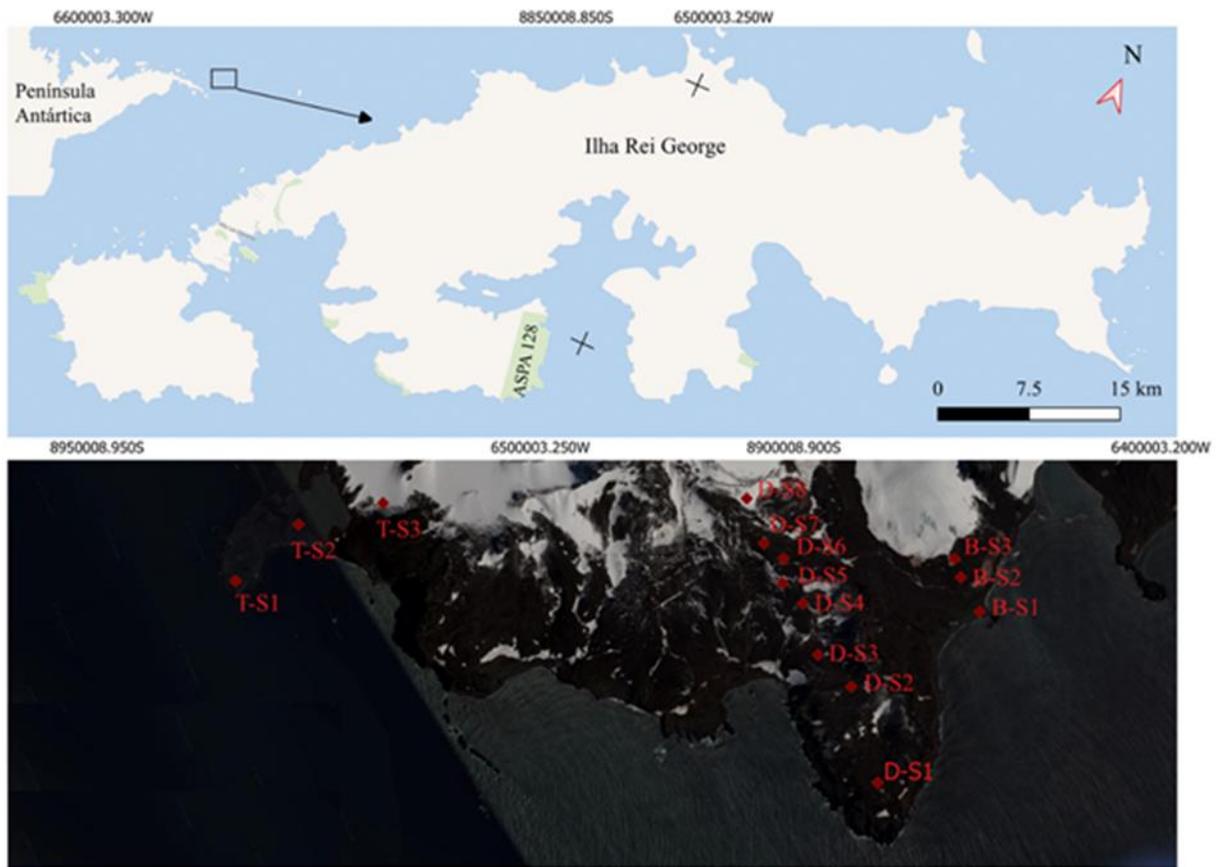


Fonte: elaborado pelo autor com imagens adquiridas do Landsat/Copernicus no Google Earth Pro.

3.2.2 Amostragem de solo e vegetação

A coleta de amostras de solo e vegetação foi realizada em sítios, delimitados por processos geomorfológicos (relevo), altitude, distância da geleira e cobertura vegetal. Os sítios estão dispostos em distâncias diferentes em relação à geleira, formando transectos (um para cada recuo de geleira) (Figura 6). No transecto de Demay Point foram delimitados 8 sítios, 3 em Baranowski e 3 em Telephone Point. Cada sítio recebeu abreviação para identificação. A abreviação consta da primeira letra do nome do recuo, mais o **S** de sítio e o número da sua respectiva posição no recuo (ex.: sítio 1 de Demay Point = D-S1). A ordem numérica dos sítios foi crescente, do sítio mais distante (ex.: D-S1) da geleira para o mais próximo (ex.: D-S8).

Figura 6 – Área de estudo na ASPA nº128 da ilha King George, Antártica Marítima. Sítios amostrados em cronosequência nos recuos Demay Point (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Telephone Point (T-S1, T-S2 e T-S3) e Baranowski (B-S1, B-S2 e B-S3).



Fonte: elaborado pelo autor com imagens adquiridas do Landsat/Copernicus no Google Earth Pro e no QGIS.

Nos sítios foram coletadas amostras de solos deformadas na profundidade de 0,00 – 0,10 m, considerando parcelas de 0,10 por 0,15 m (0,015 m²). As amostras de solo foram usadas nas análises físicas, químicas, teores de nitrogênio e carbono, termoquimólise (TMAH) e ácidos graxos fosfolípidios (PLFA). Para as análises de TMAH e PLFA as amostras de solo foram armazenadas a -20 °C, transportadas para o laboratório, liofilizadas e passadas por uma peneira de malha de 2 mm. Os exemplares vegetais coletados nas retrações das geleiras foram aqueles mais abundantes e presentes nos sítios: *Deschampsia antarctica* É.

Desv. 1854; *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. 1831; *Prasiola crispa* ssp. *antarctica* (Kütz.) Knebel; líquens (*Usnea antarctica* ssp e *Usnea aurantiacoatra* (Jacq.) Bory, 1826) e musgos (*Sanionia uncinata* (Hedw) Loeske 1907 e musgo moribundo). As distâncias dos sítios para a geleira foram determinadas no Google Earth Pro, numa imagem de 2016. A altitude dos sítios foi obtida em pesquisas realizadas na ASPA 128 por Dąbski *et al.* (2017) e Pudełko *et al.* (2018). Os processos geomorfológicos para Baranowski, Demay Point e Telephone Point foram feitos com o auxílio das descrições já publicadas (DĄBSKI *et al.*, 2017, 2020). Na abertura dos perfis de solos constatou-se a ausência de permafrost à 1 m ou mais, assim como verificado por Dabski *et al.* (2017b) em Baranowski. Descrições dos sítios, com mais detalhes, são apresentados na tabela 5 e as imagens na figura 7.

Tabela 5 – Altitude e descrição sumária dos sítios de amostragem de solo em transectos a diferentes distâncias das geleiras dos recuos de Demay Point, Baranowski e Telephone Point localizados na ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima

Recuo	Sítio	Altitude (m)	Distância da Geleira (m)	Descrição
Demay Point	D-S1	~62-79	~1.951	<i>Leptosol</i> Solo com comunidade vegetal (plantas superiores e inferiores) composta de <i>D. antarctica</i> ; <i>C. quitensis</i> ; musgos moribundos; líquens (<i>U. antarctica</i> e <i>U. aurantiacoatra</i>), presença de Skuas e escarpa para o mar.
	D-S2	~70	~1.343	Solo poligonal com criptógamas (ocorrência de musgos moribundos), líquens no entorno, presença de Skuas e ninhos delas.
	D-S3	~60-70	~1.090	<i>Turbic Cryosol</i> Solo estriado (Solifluction landfrons) com musgos (<i>S. uncinata</i> pouco desenvolvida) ocasionais nas estrias.
	D-S4	~80-90	~790	Solo com comunidades vegetais (plantas inferiores) de criptógamas (musgos e líquens), além da presença de Skuas e afloramento rochoso.

Recuo	Sítio	Altitude (m)	Distância da Geleira (m)	Descrição
	D-S5	~90-100	~483	<i>Leptosol</i> Solo com tapetes de <i>S. uncinata</i> às margens de lago periglacial, afloramento rochoso e fluxos de lama.
	D-S6	~100-110	~259	Solo sem vegetação com afloramento rochoso e deslizamento de terra em direção a Baranowski.
	D-S7	~70-80	~120	Depressão com comunidade de musgo e ocorrência de <i>D. antarctica</i> com canal de dreno para riacho em Baranowski.
	D-S8	~140	~3	<i>Cryosol</i> Paisagem proglacial – Moraina, com deslizamento de terra para o ponto de amostragem D-S7.
Baranowski	B-S1	~10	~848	<i>Cambisol</i> Terraço marinho com <i>D. antarctica</i> e <i>P. crispa</i> ssp. com afloramento rochoso (seixos rolados) entre mar e lago.
	B-S2	~20	~406	Solo com afloramento rochoso com ocorrência de <i>D. antarctica</i> entre geleira e lago.
	B-S3	~30	~3	Paisagem proglacial – Moraina/ afloramentos rochosos, deslizamentos de terra e fluxos de lama
Telephone Point	T-S1	~10-20	~902	Terraço marinho com ocupação de <i>D. antarctica</i> (em cima de camada de turfa e próximo da pinguineira), <i>C. quitensis</i> , <i>P. crispa</i> e musgo em solo sem turfa com afloramento rochoso
	T-S2	~6	~434	Terraço marinho com afloramento rochoso (seixos rolados) com ocorrência de <i>D. antarctica</i> de frente para o lago.
	T-S3	~7	~3	Paisagem proglacial – Moraina/ com afloramento rochoso e deslizamento

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 7 – Imagens dos sítios nos recuos Demay Point, Baranowski e Telephone Point



Fonte: elaborado pelo autor. Imagens de * Alison Havnes e ** Caik Miranda.

3.2.3 Frações de calhaus, cascalhos, granulometria e complexo sortivo do solo

O solo foi fracionado em peneiras, visando à separação das frações <2 mm (terra fina), 2-4 mm (cascalho), 20-4 mm (cascalho) e >20 mm (calhaus). A granulometria do solo (<2,0 mm) foi realizada pela dispersão mecânica com agitação por 16 horas a 50 rpm em conjunto com a dispersão química utilizando NaOH (1 mol L⁻¹). As frações areia grossa (2-0,21 mm) e areia fina (0,21-0,053 mm) foram separadas por tamizagem e a fração argila (<0,002 mm) pelo método da pipeta, sendo silte obtido por diferença (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

As análises do complexo sortivo foram: pH em água por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo:líquido (água), na proporção 1:2,5; H+Al foram extraídos com Ca (OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹ tamponado a pH 7,0 e quantificado via titulação com NaOH 0,0606 mol L⁻¹. Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos com 1 mol L⁻¹ de KCl e determinados por espectroscopia de absorção atômica; K⁺ e P disponível foram extraídos com Mehlich-1 e quantificados por fotometria de chama (K⁺) e fotocolorimetria (P disponível). O P remanescente (P-rem) foi determinado pela concentração de P da solução de equilíbrio quando se agita por 1 hora, na relação 1:10, solo (< 2,00 mm) com solução 0,010 mol L⁻¹ de CaCl₂ contendo 60 mg L⁻¹ de P. Estimativas foram feitas, tais como: a soma de bases (SB) pela soma das bases trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺); a capacidade de troca catiônica efetiva (CTC_e) pela SB mais Al³⁺; a capacidade de troca catiônica total (CTC_t) pela SB mais a acidez potencial (H+Al); a saturação por bases (V%) por: $V = (100 * \text{valor SB}) / \text{CTC}_t$; e a saturação por alumínio (m%) por $m = (100 * \text{Al}^{3+}) / (\text{valor SB} + \text{Al}^{3+})$.

3.2.4 C orgânico e N totais e da matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM)

As amostras de solo (<2 mm) foram fracionadas em matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM), segundo Cambardella e Elliott (1992). Para isso, 10 g de solo (< 2 mm) foram dispersos em 15 mL de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹) e agitados por 15 horas a 140 rpm. Após agitação, as amostras foram passadas por uma peneira de 0,053 mm, resultando nas frações MOP (2,00-0,053 mm) e MOAM (<0,053 mm). As frações MOP e MOAM foram secas em estufa a 60°C, pesadas e passadas em malha de 0,149 mm, para posteriores análises.

Os teores de C orgânico da MOP e MOAM foram quantificados por oxidação da via úmida com $K_2Cr_2O_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ em meio sulfúrico, empregando como fonte de energia o calor desprendido pelo H_2SO_4 , juntamente com uma fonte externa de aquecimento (YEOMANS; BREMNER, 1988). O excesso de $K_2Cr_2O_7$ foi titulado com solução de sulfato ferroso amoniacal $[Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O]$ $0,102 \text{ mol L}^{-1}$. Os teores de N da MOP (N-MOP) e MOAM (N-MOAM) foram quantificados por meio de digestão utilizando H_2O_2 30%, H_2SO_4 e mistura digestora, destilação e quantificação por titulação com HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Para os teores totais de C orgânico e N (C-Total e N-Total) foram considerados os teores de C e N da MOAM e MOP ponderando-se as massas de solo da MOAM e MOP (equação 1).

$$C - Total = \frac{(MassadaMOP * teorC - MOP) + (MassadaMOAM * teorC - MOAM)}{MassadaPOM + MassadaMOAM} \quad (\text{equação 1})$$

3.2.5 Extração de compostos pela técnica de termoquimólise (TMAH)

Amostras de 200 mg de MOP e 100 mg de MOAM foram pesadas diretamente em frascos (vial) para aplicação da técnica de termoquimólise baseada nos trabalhos de (CHEFETZ; CHEN; CLAPP, 2000; DEL RIO *et al.*, 1998; ESTOURNEL-PELARDY *et al.*, 2011; GRASSET; AMBLE, 1998; SHADKAMI; HELLEUR, 2010; YOUNES; GRASSET, 2018). Os procedimentos da técnica de termoquimólise foram: (i) adição de hidróxido de tetrametilamônio pentahidratado (TMAH) às amostras de MOP e MOAM; (ii) evaporação com temperatura de $38 \text{ }^\circ\text{C}$ e sob fluxo de nitrogênio; (iii) transferência das amostras para mufla a uma temperatura de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 min; (iv) adição de diclorometano (DCM), agitação e filtração; (v) adição de padrão interno (Nonadecanoato de Metila); (vi) transferência para evaporador a uma temperatura de $38 \text{ }^\circ\text{C}$ e sob fluxo de nitrogênio; e (vii) após a secagem, as amostras receberam $100 \text{ } \mu\text{L}$ de DCM e agitadas, transferindo-o para o inserts contido no frasco de rosca. Posteriormente, os compostos foram separados e identificados pelo método físico-químico do espectrômetro de massa do cromatógrafo a gás (GC-MS / MS-QP2010SE). Para o procedimento foi injetado $1 \text{ } \mu\text{L}$ da amostra de cada fração (MOP e MOAM) numa coluna capilar Rtx – 5 MS (5% bifenil, 95% dimetilpolisiloxano) $30 \text{ m} \times 0,25 \text{ mm} \times 0,25 \text{ } \mu\text{m}$. A rampa de aquecimento foi de 60°C , 150°C e 300°C . O gás de arraste foi o hélio (He). O espectrômetro de massas foi operado no modo de impacto eletrônico a 70 e V em faixa de

varredura de 35-700 *m/z*. A identificação dos compostos no GC-MS foi ajustada para 85% de similaridade.

A identificação das moléculas e estruturas dos compostos químicos da matéria orgânica do solo foi realizada por meio de buscas às bibliotecas do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) e do Centro Nacional de Informações sobre Biotecnologia (NIH) na Biblioteca Nacional de Medicina. Os compostos orgânicos foram categorizados em: (i) funções dos compostos orgânicos: nitrogenadas, oxigenadas, hidrogenadas e mistas; (ii) funções orgânicas: ésteres, éter, ácido carboxílico, hidrocarboneto, álcool e amina; (iii) estrutura da cadeia molecular: alifáticos, alifáticos cíclicos e aromáticos; e (iv) compostos orgânicos: aminoácidos, derivados de lignina, lipídios, carboidratos, compostos de nitrogênio (compostos contendo nitrogênio que não se enquadram nas outras categorias), terpenos, bioativos (compostos antifúngicos, antibacterianos e semioquímicos em geral), biopolímeros (compostos estruturais como cutina, quitina, cutícula e etc.), marcadores de atividade microbiana (MAM) e outros. A categoria outros representa compostos não identificados ou que não se enquadraram nas demais categorias. Todas as caracterizações orgânicas foram realizadas com base em artigos publicados em periódicos, com base nos trabalhos de (DE AQUINO *et al.*, 2019; DESHMUKH; CHEFETZ; HATCHER, 2001; ESTOURNEL-PELARDY *et al.*, 2011; FRAZIER *et al.*, 2003; JERRY PULCHAN; HELLEUR; ABRAJANO, 2003; NIEROP; VAN LAGEN; BUURMAN, 2001; WANG *et al.*, 2011). Admitiu-se, para este estudo, que todos os hidrocarbonetos com cadeia de C múltipla de 5 (cinco) pertenciam ao grupo dos terpenos por não conter nenhuma característica/função orgânica dos demais compostos (BORGES, L. P.; AMORIM, 2020). Os resultados da caracterização dos compostos orgânicos, com o tempo de retenção, estão disponíveis nas tabelas suplementares TS2 e TS3 (Tabelas 8 e 9).

3.2.6 Análise de dados

A análise dos dados foi realizada por meio de tabulações em planilha e imagens gráficas. As análises de componentes principais (PCA), correlação de Pearson e a rede de correlação de Pearson foram realizadas no programa RStudio (versão 5594.2.0.0). A aplicação do teste t para a comprovação ou não do ganho de C e N com a retração das geleiras, comparando-se os dados pareados dos solos recém-expostos (ambiente proglacial) e mais intemperizados, estáveis e com ocupação vegetal (ambiente periglacial) no programa BioEstat 5.0.

Na análise de componentes principais (PCA) foram utilizados os seguintes pacotes: *factoextra*, *factoMiner* e *tidyverse*. O solo ornitogênico (T-S1) do recuo Telephone Point, por receber a maior parte material orgânico de animais marinhos e não do continente, apresentou um padrão diferente dos demais recuos, agrupando a maioria dos atributos orgânicos para si. Dessa maneira, o sítio T-S1 não foi apresentado nas análises de componentes principais (PCA), mas pode ser encontrado integralmente nas figuras suplementares (FS1 e FS2).

Por fim, foi realizado o mapeamento de compostos orgânicos presentes na vegetação e no solo para a análise da relação entre compostos da MOS e da vegetação por meio da correlação de Pearson. A correlação de Pearson foi realizada utilizando-se o pacote *corrplot* para obter os valores de r-Pearson e sua significância à 1 e 5 %. Posteriormente, para elaborar a rede de correlação utilizou os pacotes *tidyverse*, *tidytuesdayr*, *ggplot2* e *pacmam*.

3.3 Resultados

3.3.1 Caracterização física, química e teores de C e N do solo

A separação das frações dos solos >2 mm (frações grosseiras) e <2,00 mm (areia grossa, areia fina, silte e argila) revelaram que os solos dos recuos avaliados são dominados por frações grosseiras, na camada de 0,00 – 0,10 cm (Tabela 6). A separação das frações físicas do solo revelou maior representatividade de cascalhos (frações de 2-4 mm e 4-20 mm), sendo mais abundante em fragmentos tamanho entre 4-20 mm, este último variando de 140 a 392 g kg⁻¹ nos recuos Demay Point e Telephone Point. Em Baranowski, a maior proporção de frações grosseiras foi de calhaus (> 20 mm), variando de 319 a 469 g kg⁻¹.

Na granulometria dos solos de todos os recuos avaliados, a areia grossa apresentou as maiores proporções, entre 295 e 574 g kg⁻¹. A fração argila, de maneira geral, foi a menos representativa, variando de 10 a 206 g kg⁻¹. O recuo de Demay Point apresentou sítios com solos de textura franca (D-S2, D-S3, D-S6 e D-S7, respectivamente solos poligonal, estriado, nu e com depressão), três sítios franco arenosa (D-S1, D-S4 e D-S5/comunidades criptoendolíticas) e franco argilo arenoso (sítio D-S8 - moraina) (Tabela 10). Os recuos mais jovens (Baranowski e Telephone Point) foram dominantes em textura franco arenosa. Todos os sítios apresentaram maiores

quantidades de silte do que argila, exceto no ponto de amostragem T-S2 de Telephone Point com porcentagem de argila 15% superior de silte (Tabela 6).

Tabela 6 – Médias das frações granulométricas de solos coletados na camada de 0,00 – 0,10 m em sítios localizados em transectos a diferentes distâncias das geleiras dos recuos de Demay Point, Baranowski e Telephone Point localizados na ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima

Recuo / Sítios	Frações das amostras do solo (g kg ⁻¹)				Granulometria do solo < 2mm (g kg ⁻¹)				Classe Textural
	>20 mm	20-4 mm	4-2 mm	<2 mm	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	
<i>Demay Point</i>									
D-S1	254,3	391,7	131,31	220,8	531,7	74,0	174,7	121,8	Franco arenosa
D-S2	345,6	303,8	163,43	421,2	295,9	95,7	352,6	126,4	Franca
D-S3	164,2	340,8	247,4	503,22	389,7	48,8	244,4	193,2	Franca
D-S4	99,7	266,5	154,6	413,67	494,1	320,3	210,4	121,6	Franco arenosa
D-S5	69,8	310,3	228,9	281,05	453,9	453,9	173,8	200,1	Franco arenosa
D-S6	102,0	374,2	600,0	705,00	437,6	49,8	221,2	205,9	Franca
D-S7	42,9	140,0	224,8	639,20	356,2	66,1	269,1	159,9	Franca
D-S8	317,2	234,3	280,7	693,00	463,5	45,0	169,5	199,2	Franco argilo arenoso
<i>Telephone Point</i>									
T-S1	248,3	343,4	106,4	301,94	512,8	78,0	91,5	170,5	Franco arenosa
T-S2	69,1	185,1	99,4	646,38	573,6	59,3	11,6	130,2	Areia franca
T-S3	33,4	63,6	84,6	818,31	613,8	36,4	201,6	10,0	Franco arenosa
<i>Baranowski</i>									
T-S1	469,4	124,9	66,4	339,26	533,4	78,5	266,2	27,8	Franco arenosa
T-S2	356,7	199,3	82,7	361,23	332,3	332,3	332,7	95,7	Franco arenosa
T-S3	319,8	67,7	41,4	571,06	332,3	332,3	343,3	22,9	Franco arenosa

Entre todos sítios, os de maior densidade vegetal e com diferentes espécies (Demay Point, sítios D-S1, D-S4 e D-S7) ou com somente *D. antarctica* e alta atividade animal (Telephone Point em T-S1 e Baranowski em B-S1) observou-se um aumento da acidez do solo. O aumento da acidez ativa (pH), trocável (Al³⁺) e potencial (H+Al) (Tabela 7) foi constatado nesses sítios quando comparados aos demais, porém, nem sempre, nesses mesmos sítios, a saturação de bases foi tão baixa assim (V>90%). A redução da saturação de bases (V) ocorreu em D-S1 e T-S1 e está associada a redução de dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, respectivamente, com o aumento do distanciamento das geleiras. Contudo, em Baranowski ocorreu o oposto de Demay Point e Telephone Point, ou seja, com o maior distanciamento da geleira ocorreu maiores teores de Mg²⁺. Também em B-S1 e T-S1 constatou-se o aumento de P disponível, com teores mais elevados em T-S1.

Tabela 7 – Atributos químicos de solos coletados de sítios em transectos a diferentes distâncias das geleiras dos recuos de Demay Point, Baranowski e Telephone Point, localizados na ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima

Recuo / Sítios	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTCe	CTC	V	m	P _{Rem}
		---mg dm ⁻³ ---	-----Cmodm ⁻³ -----							----%----	Mg L ⁻¹		
<i>Demay Point</i>													
D-S1	5,8	151,0	168,0	5,5	11,7	1,2	6,7	17,7	18,9	24,4	72,5	6,6	27,8
D-S2	7,1	63,0	232,0	10,4	12,7	0,0	1,6	23,8	23,8	25,4	93,7	0,0	25,7
D-S3	7,3	105,3	136,0	21,9	15,4	0,0	0,6	37,7	37,7	38,3	98,4	0,0	35,1
D-S4	6,2	85,9	118,0	12,1	12,8	0,4	4,6	25,3	25,7	29,9	84,6	1,5	30,3
D-S5	6,7	113,0	178,0	22,7	10,7	0,0	1,1	33,9	33,9	35,0	96,9	0,0	43,3
D-S6	7,5	224,5	142,0	27,6	13,8	0,0	1,1	41,8	41,8	42,9	97,4	0,0	24
D-S7	6,1	70,3	178,0	18,8	21,6	0,7	3,5	40,8	41,5	44,3	92,1	1,6	28,1
D-S8	7,1	70,7	154,0	23,2	25,7	0,0	1,3	49,3	49,3	50,6	97,4	0,0	40,8
<i>Telephone Point</i>													
T-S1	5,8	3958,4	350,0	2,6	4,5	0,1	9,6	8,0	8,1	17,7	46,4	0,6	51,1
T-S2	4,9	340,2	540,0	15,6	7,9	2,2	6,7	24,9	27,1	31,6	78,8	8,2	25,7
T-S3	8,3	517,6	74,0	77,9	6,3	0,0	0,3	84,5	84,4	84,7	99,6	0,0	44,7
<i>Baranowski</i>													
B-S1	7,1	405,7	272,0	25,7	6,8	0,0	1,3	33,2	33,2	34,5	96,2	0,0	40,3
B-S2	8,4	250,0	96,0	25,2	4,6	0,0	0,2	30,0	30,0	30,3	99,3	0,0	46,3
B-S3	8,4	351,6	72,0	25,6	4,8	0,0	0,0	30,6	30,6	30,6	100,0	0,0	45,7

Nota: Potencial hidrogeniônico (pH) em água; fósforo remanescente (P_{Rem}); cátion de potássio (K⁺); fósforo disponível (P); soma de bases trocáveis (SB); capacidade de troca catiônica efetiva (CTC_e); capacidade de troca catiônica (CTC); saturação por bases (V); saturação por alumínio (m); alumínio (Al³⁺); acidez potencial (H+Al); **cátion de cálcio** (Ca²⁺) e cátion de magnésio (Mg²⁺).

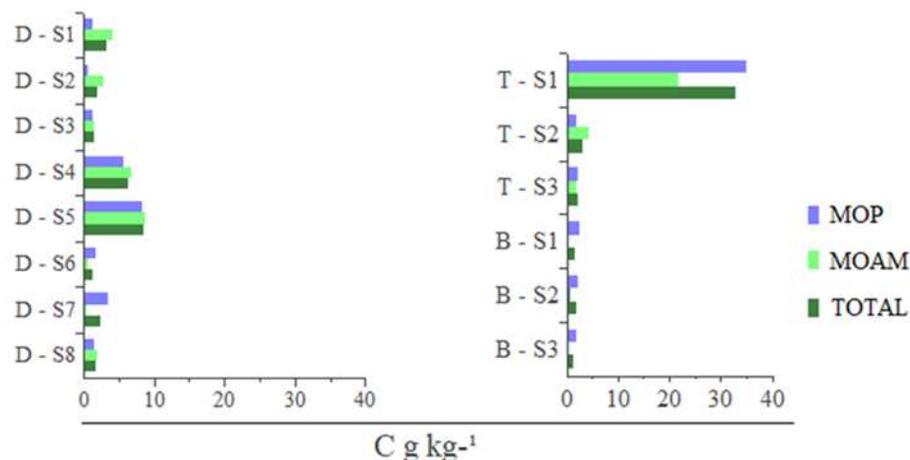
Os teores de C orgânico e N total apresentaram padrões semelhantes ao longo dos recuos, exceto Baranowski (Figuras 8 e 9). O padrão observado nos recuos foi que sítios com maiores teores de C apresentaram os maiores teores de N em todos os compartimentos da matéria orgânica (MOP, MOAM e total). Telephone Point, um dos recuos de menor extensão de solo exposto sob interferência ornitogênica, apresentou os maiores teores de C orgânico (17,890 g kg⁻¹) e N total (0,003 g kg⁻¹), ao considerar a média geral dos sítios (C = 4,60 g kg⁻¹ e N = 0,001 g kg⁻¹). Em Demay Point, com solos não-ornitogênicos e maior tempo de exposição, foi o segundo recuo com maiores teores médios de C (3,528 g kg⁻¹) e N (0,0007 g kg⁻¹) total. Os menores teores de C (2,788 g kg⁻¹) e N (0,0001 g kg⁻¹) total foi verificado nos solos não-ornitogênicos de Baranowski.

Os recuos com menor tempo de exposição de solo apresentaram maiores teores de C e N somente em sítios sob influência animal, especialmente pinguins (Telephone Point: T-S1). Em Demay Point, retração frequentada por skuas, apresentaram maiores teores de C e N em áreas com comunidades vegetais (sítios D-S1: plantas superiores, criptograma e criptoendolíticas; e D-S4:

criptógama e criptoendolíticas) ou em tapetes de musgos sob condições hidromórficas (D-S5). Em Baranowski, o recuo de geleira mais recente (~50 anos) constatou-se teores de N total somente no sítio B-S1, o qual esteve sob influência animal, no caso, lobo-marinho. Nos demais sítios (T-S3, B-S2 e B-S3), os teores de N total estiveram abaixo do limite de detecção do método utilizado nas análises.

Todos os sítios apresentaram teores de C acima do limite de detecção do método Walkey Black, o que não aconteceu com N total, geralmente abaixo, especialmente em áreas recentemente expostas (T-S3, B-S2 e B-S3) (Figura 8). Os maiores teores de C foram encontrados nos sítios mais distantes da posição da geleira, com valores de 35,10; 21,71 e 32,89 g kg⁻¹ para MOP, MOAM e C orgânico total, respectivamente. Em Demay Point, a MOAM apresentou maiores teores detectáveis de C, porém, em média os teores de C orgânico total são muito próximos, no caso 4,2; 4,9 e 5,3 g kg⁻¹, respectivamente. Baranowski e Telephone Point apresentaram os maiores teores médios de C na MOP em todos os sítios, exceto o T-S2, respectivamente 2,23; 1,53 e 2,03 g kg⁻¹ para MOP, MOAM e C total.

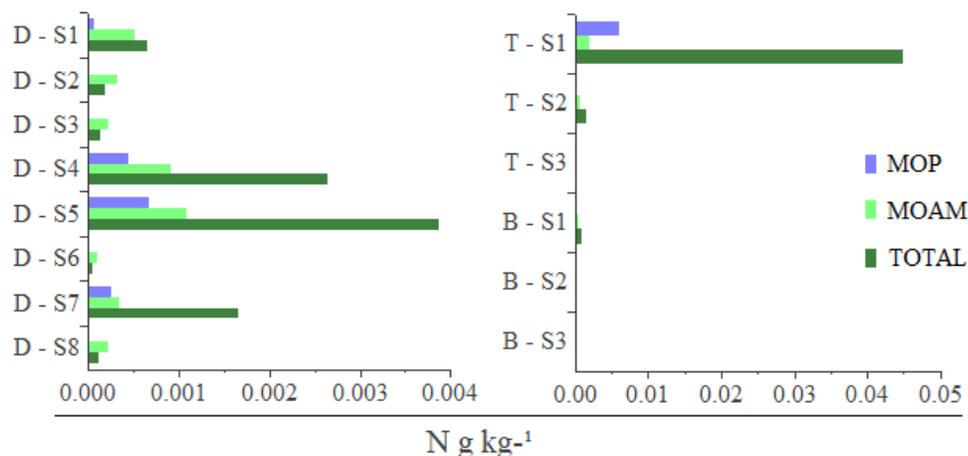
Figura 8 – Teores de C da matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) e total dos sítios de Demay Point (sítios D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Baranowski (sítios B-S1, B-S2 e B-S3) e Telephone Point (sítios T-S1, T-S2 e T-S3) da ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os teores de N-total no solo foram baixos nos sítios dos três recuos analisados (Demay Point, Telephone Point e Baranowski), em média menores que $0,0006 \text{ g kg}^{-1}$. O ponto de amostragem mais distante da geleira de Telephone Point foi o único que apresentou teores de N acima da média, com $0,006$ e $0,045 \text{ g kg}^{-1}$ na MOP e N-total, respectivamente (Figura 9). De maneira geral, os teores de N da MOP e MAOM foram semelhantes ($0,00051 \text{ g kg}^{-1}$ MOP e $0,00058 \text{ g kg}^{-1}$ MOAM, considerando todo os sítios) – quando comparado, somente, os sítios com teores detectados, a MOP possui os maiores teores de N com $0,0011 \text{ g kg}^{-1}$ versus $0,00059 \text{ g kg}^{-1}$ MOAM. Nas margens das geleiras (sítios D-S8, T-S3 e B-S3) não foram detectados, pela análise, teores de N na MOP e somente o sítio D-S8 de Demay Point apresentou teores de N na MOAM.

Figura 9 – Teores de N da matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) e total dos sítios de Demay Point (sítios D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Baranowski (sítios B-S1, B-S2 e B-S3) e Telephone Point (sítios T-S1, T-S2 e T-S3) da ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima.



Fonte: laborado pelo autor.

Com a retração das geleiras houve um aumento dos teores de N em todas as frações da matéria orgânica (MOP e MOAM) e N-total dos sítios mais distantes das geleiras, embora muito baixos, com os valores totais mais altos próximos de $0,07 \text{ g kg}^{-1}$. As médias de N para ambientes proglaciais (D-S8, T-S3 e B-S3) foram $0,00022 \text{ g kg}^{-1}$ para MOAM e $0,00001 \text{ g kg}^{-1}$ para N-total (não foi detectado teores de N na fração MOP). Em ambientes periglaciais, mais distantes da geleira (D-S1, T-S1 e B-S1), as médias de N foram $0,0013 \text{ g kg}^{-1}$ na MOP; $0,0008 \text{ g kg}^{-1}$ na MOAM e $0,01 \text{ g kg}^{-1}$ para N-total.

Os teores de C foram mais expressivos nos ambientes periglaciais, com 5x mais C que os ambientes periglaciais. As médias de C nos ambientes proglaciais foram 1,96 g kg⁻¹ na MOP, 1,40 g kg⁻¹ na MOAM e 1,80 g kg⁻¹ C-total. Já nos ambientes periglaciais, as médias C foram 9,05 g kg⁻¹ MOP, 7,51 g kg⁻¹ MOAM e 9,31 g kg⁻¹ C-total. De maneira geral, não houve diferenças significativas ($p > 5\%$, teste-t) para os teores de C e N das frações na comparação de médias entre ambientes recentemente expostos (Proglacial) e ocupados por vegetação (Periglacial) (Tabelas 10 e 11 – Tabelas suplementares: carbono/ TS4 e nitrogênio/ TS5).

3.3.2 Composição molecular das espécies vegetais superiores e inferiores (criptogamas e criptoendolíticas)

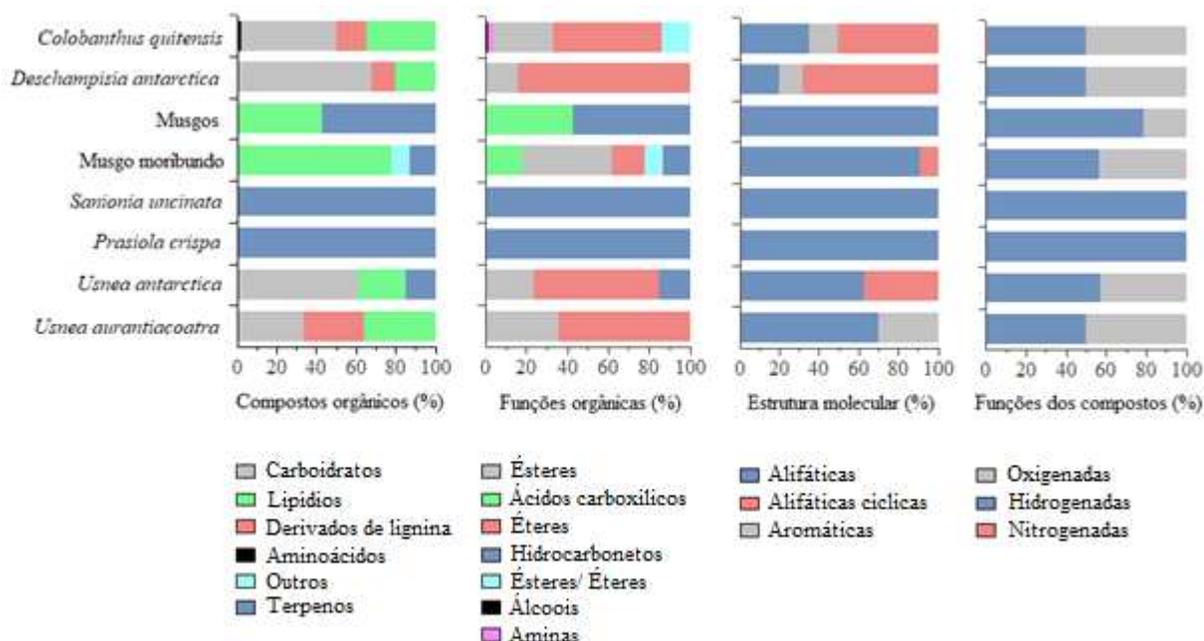
De maneira geral, a vegetação presente nas retrações das geleiras foi abundante nos seguintes compostos orgânicos: carboidratos, lipídios e terpenos (Figura 10). Carboidratos foram abundantes nas espécies *D. antarctica* (68,2 %), *C. auitensis* (47,88 %) e *U. antarctica ssp* (30,3 %), enquanto lipídios o foram em musgos *spp* (43 %) e musgos moribundos (77 %). Os terpenos também foram abundantes em musgos *spp* (57 %), *Sanionia uncinata* (100 %) e *Prasiola crispa ssp* (100 %). Derivados de lignina foram encontrados em relevante abundância nas plantas superiores (*D. antarctica* 11 % e *C. quitensis* 15 %) e no líquen *U. aurantiacoatra* (34 %).

As funções orgânicas mais abundantes encontradas foram os ésteres, éteres e hidrocarbonetos. Eles foram identificados principalmente em plantas inferiores, onde coexistem com altos níveis de terpenos. Nas plantas superiores, os éteres predominaram, compreendendo uma faixa de 53% a 84% da composição orgânica. Além disso, essas mesmas funções orgânicas também foram observadas em organismos criptoendolíticos, como líquens, com uma porcentagem entre 60% e 64%. Já os ésteres foram mais prevalentes em musgos moribundos, perfazendo aproximadamente 44% da sua composição.

A estrutura molecular da vegetação presente é dominada por cadeias alifáticas nas plantas inferiores, com abundância entre 62 e 100% (Figura 10). As cadeias alifáticas cíclicas foram abundantes nas plantas superiores, com domínio na espécie *D. Antarctica* representando 68,20 %. A aromaticidade na maioria dos exemplares não ultrapassou 15% da abundância, atingindo o máximo de 30,30 % na espécie *U. Aurantiacoatra*.

A vegetação da Antártica apresentou alta abundância de funções hydrogenadas, entre 50 e 100% (Figura 10). As espécies *D. Antarctica*, *C. Quitensis* e *U. Aurantiacoatra* possuem 50% de compostos oxigenados, sendo o restante da abundância representado por funções de compostos hydrogenados. As espécies *S. uncinata* e *P. crispa* apresentaram 100% de compostos hydrogenados.

Figura 10 - Abundância (%) de compostos orgânicos dos vegetais da ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.3 Compostos moleculares da matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) do solo

A retração das geleiras promoveu a diversificação dos compostos moleculares presentes em ambas as frações da matéria orgânica do solo (Figura 11). Esse padrão foi mais evidente em Demay Point, a área com transecto mais extenso e possivelmente de deglaciação mais antiga entre as áreas estudadas. Em ambientes proglaciais foram registrados domínio lipídico, com gradual incremento para até 10 grupos de compostos moleculares em ambientes periglaciais: aminoácidos, biopolímeros, bioativos, carboidratos, derivados de lignina, lipídios, marcadores de atividade

microbiana, compostos nitrogenados, terpenos e vitaminas. As mudanças de composição foram mais sensíveis em sítios de comunidades mistas de plantas ou musgos (MOP em D-S1, D-S4, D-S5, D-S7, T-S1 e B-S1 da MOP; e MOAM em D-S1, D-S4, D-S5 e T-S1MOAM). Constatou-se, ainda, que os lipídios foram mais abundantes na MOP dos sítios de maior altitude dos recuos avaliados (D-S6 e D-S8, com altitude entre 100-140 m respectivamente), bem como em solos estriados (D-S3) e poligonais (D-S2), representando entre 70 e 90%. Em sítios vegetados, essa abundância de lipídios cai para um mínimo de 45% (D-S4), tendo como perda média de 50% quando em vegetação mais densa. Quando se avaliou a MOAM, observou-se que a redução da concentração de lipídios é maior com o aumento da distância em relação às geleiras. A redução da abundância de lipídios na MOAM chega à quase 80% nos sítios de com comunidades vegetais (sítios D-S1 e D-S4) ou sob vegetação mais densa (D-S5) em condições hidromórficas do recuo Demay Point.

A ocorrência e abundância dos compostos orgânicos foram variáveis de um sítio para outro, assim como nos diferentes recuos (Figura 11). Os bioativos foram frequentes na MOP e MOAM de todos os recuos. Em Demay Point, a abundância variou pouco, entre 0 e 6,5 % para ambas as frações da MOS (em média, 2,8 na MOP e 3,7 % MOAM), sendo que a menor abundância (<1%) foi na MOAM de Baranowski (B-S1 e B-S2) e a maior (>70%) na MOP de Telephone Point (T-S3). Em Telephone Point houve a redução de mais de 50% da abundância de bioativos na MOP, comparando-se T-S3 e T-S1.

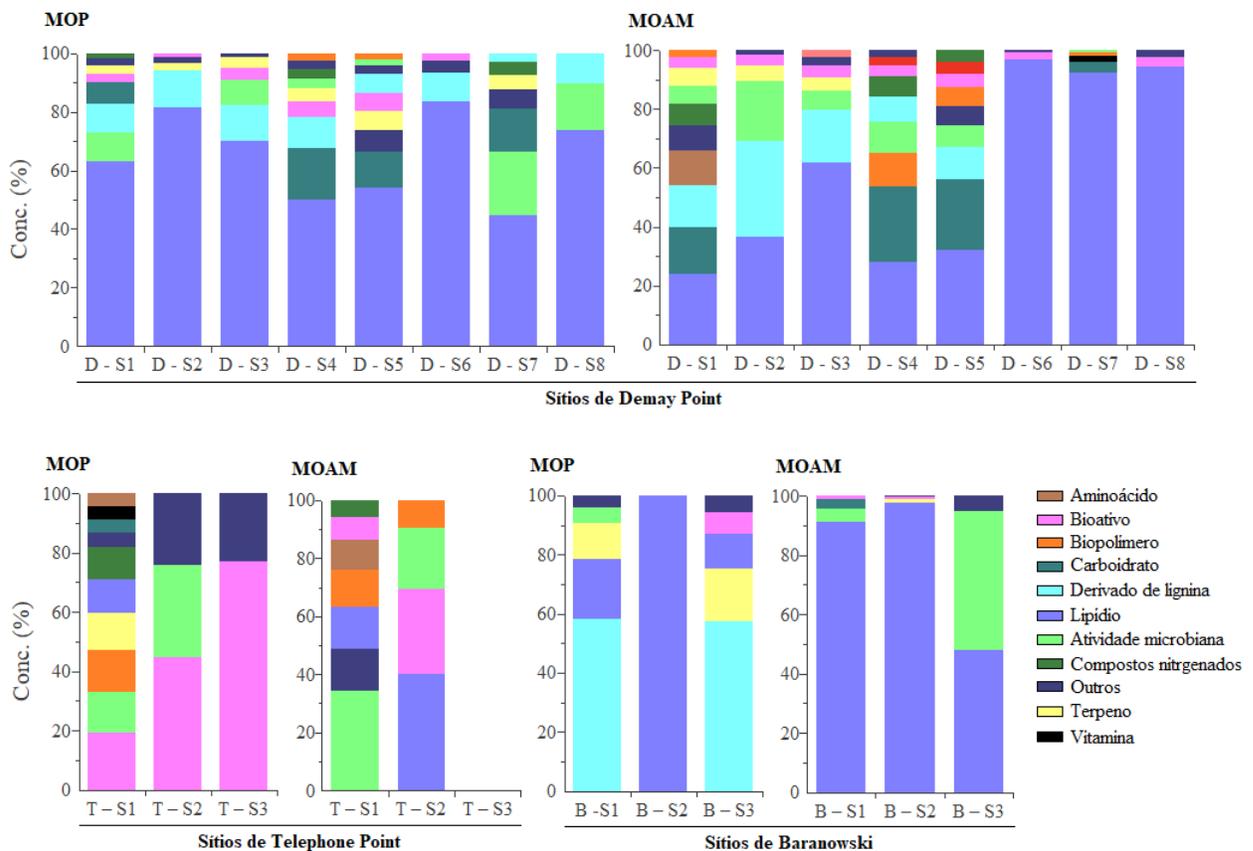
Carboidratos, compostos nitrogenados e biopolímeros foram abundantes somente em sítios com maior população vegetal (D-S5, D-S7, T-S1 e B-S1) e/ou comunidades vegetais (D-S1 e D-S4), sendo as maiores proporções de carboidratos observadas em Demay Point (D-S4 e D-S5; ~23%) e compostos nitrogenados e biopolímeros, porém com menores porcentagens (10-15%). Os compostos nitrogenados apresentaram maiores abundâncias na MOAM, em sítios com comunidades vegetais em Demay Point (D-S1 e D-S4) e na MOP em Telephone Point (T-S1), mas não chegaram a 10% e 11%, respectivamente. Já os biopolímeros apresentaram quase 15% em ambas as frações, MOP e MOAM, em Telephone Point.

Os terpenos foram encontrados na MOP dos sítios vegetados, sendo mais abundantes em sítios com musgos 6,51 %, de Demay Point (D-S4, D-S5 e D-7). Porém, na MOAM foram detectados somente nos sítios mais distantes das geleiras (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4 e D-S5) com abundância entre 2 e 6%. Os terpenos foram similares a compostos nitrogenados em relação a

abundância, entre 10 e 15%, na MOP de Telephone Point e Branowski (T-S1, B-S1 e B-S3), respectivamente, não sendo detectados na MOAM.

Os compostos semelhantes a derivados de ligninas foram encontrados na fração MOP em todo o recuo de Demay Point, com variações $\leq 10\%$, o que não ocorreu com a MOAM, presentes somente em sítio vegetados. Estes derivados de lignina somente se repetiram nos sítios B-S1 e B-S3, com abundância de quase 60% na MOP. Os derivados de lignina não apresentaram um padrão de ocorrência nos sítios dos recuos, no entanto, na MOAM de Demay Point só apresentaram abundância a partir de 480 m da geleira, com até 30% no sítio D-S2, o qual possui solo poligonal.

Figura 11 – Abundância (%) de compostos orgânicos da matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) de diferentes sítios de Demay Point (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Baranowski (B-S1, B-S2 e B-S3) e Telephone Point (T-S1, T-S2 e T-S3) da ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima

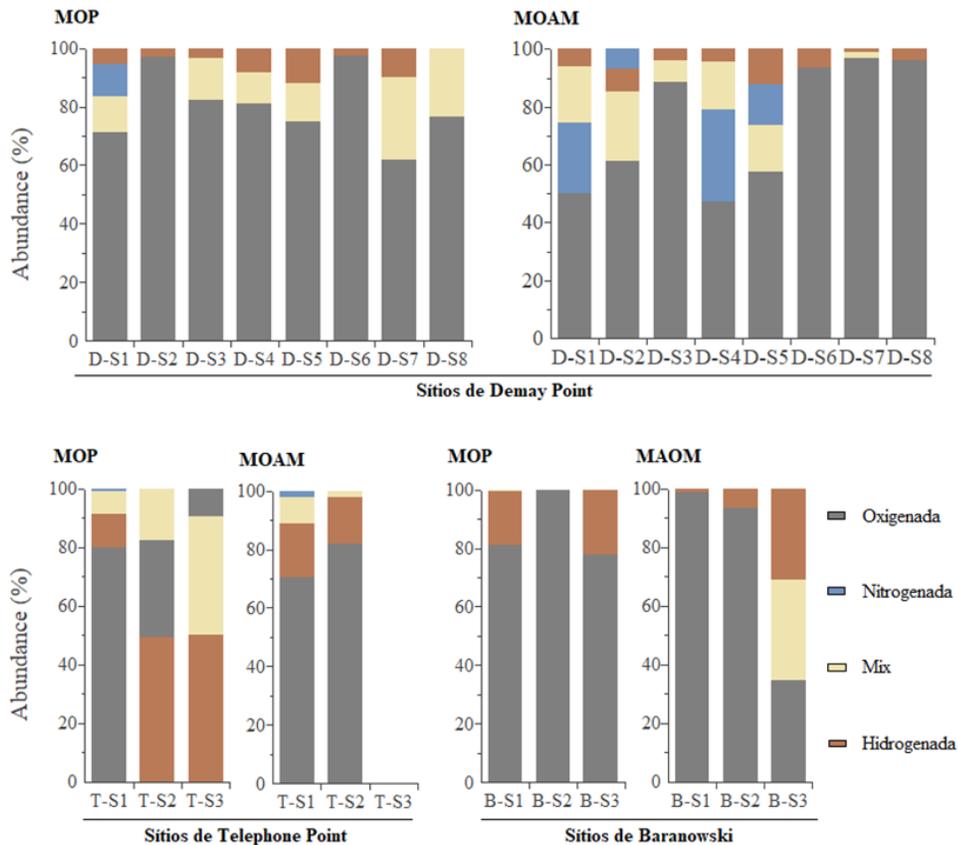


Fonte: elaborado pelo autor.

A classificação das moléculas em funções nitrogenadas, hidrogenadas e oxigenadas apontou a redução de funções oxigenadas com do tempo de exposição dos sítios por deglaciação. Os recuos com menor tempo de exposição de solos apresentaram um aumento de funções oxigenadas de 10% (sítio T-S3) para 80% (sítio T-S1) na MOP e de 35% (sítio B-S3) para quase 100% (sítio B-S1) na MOAM. A redução de funções oxigenadas coincidiu com a redução de 20% das funções mistas (contendo hidrogênio, nitrogênio e oxigênio na mesma molécula).

No recuo com maior tempo de exposição houve, de maneira geral, apenas um leve aumento de funções oxigenadas com a retração da geleira na MOP. Já na MOAM verificou-se uma redução das funções oxigenadas nos recuos de Demay Point e Telephone Point, com até 50% nos sítios D-S1 e D-S4, e um aumento da abundância de funções mistas de 20%. As maiores abundâncias de funções nitrogenadas ocorreram nas comunidades vegetais e tapetes de musgos de Demay Point, assim como as funções hidrogenadas com valores $\leq 10\%$ na MOP e MOAM. Entretanto, a abundância de funções hidrogenadas chegou a 50% na MOP de Telephone Point e 20-30% na MOP e MOAM de Baranowski (Figura 12).

Figura 12 – Abundância (%) de funções nitrogenadas, hidrogenadas e oxigenadas da matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) de diferentes sítios de Demay Point (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Baranowski (B-S1, B-S2 e B-S3) e Telephone Point (T-S1, T-S2 e T-S3) da ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima



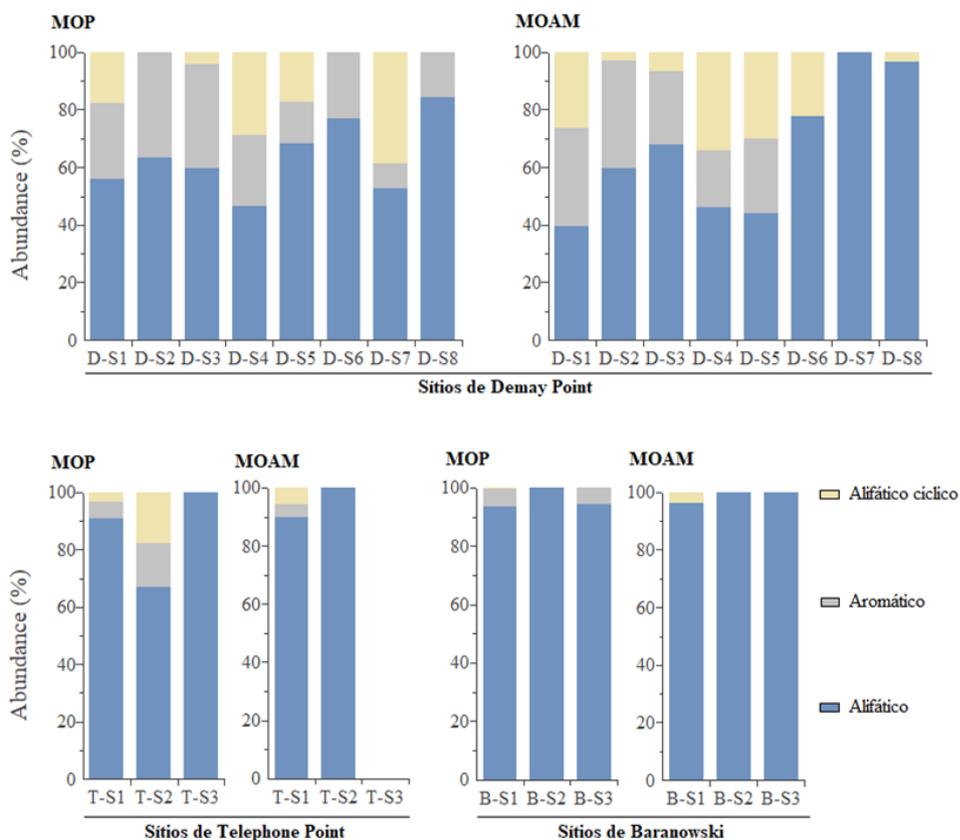
Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação a estrutura das cadeias moleculares, verificou-se a redução da abundância das cadeias alifáticas em todas as retrações de geleiras (Figura 13), seja na MOP ou na MOAM. Exceção ocorreu em Baranowski, onde as abundâncias de cadeias alifáticas na MOP o foram em proporções semelhantes (~ 93%), seja próximo (B-S1) ou distante (B-S3) das geleiras. As reduções de cadeia alifáticas chegam a 56% na MOP em D-S4 e 60% na MOAM em D-S1, todos em Demay Point.

A redução de cadeias alifáticas levou a um aumento da abundância de cadeias aromáticas e alifáticas cíclicas, tendo sido constatado certa abundância na MOP de todos os sítios de Demay Point (MOP). Porém, na MOAM, as cadeias aromáticas apresentaram abundância em sítios um tanto quanto próximos (D-S5 – 483 m) ou distantes (D-S1 – 1.951 m) das geleiras. As maiores

abundâncias de cadeias alifáticas cíclicas e aromáticas ocorreram em sítios ocupados por comunidades vegetais ou em tapetes de musgos, com quase 40% de aromaticidade (D-S4 e D-S7) e alifáticos cíclicos (D-S2 e D-S3) na MOP e maior que 30% para ambos os compostos na MOAM (D-S1, D-S4 e D-S5).

Figura 13 – Abundância (%) de estruturas alifáticas, aromáticas e alifáticas cíclicas da matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) de diferentes sítios de Demay Point (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Baranowski (B-S1, B-S2 e B-S3) e Telephone Point (T-S1, T-S2 e T-S3) da ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima

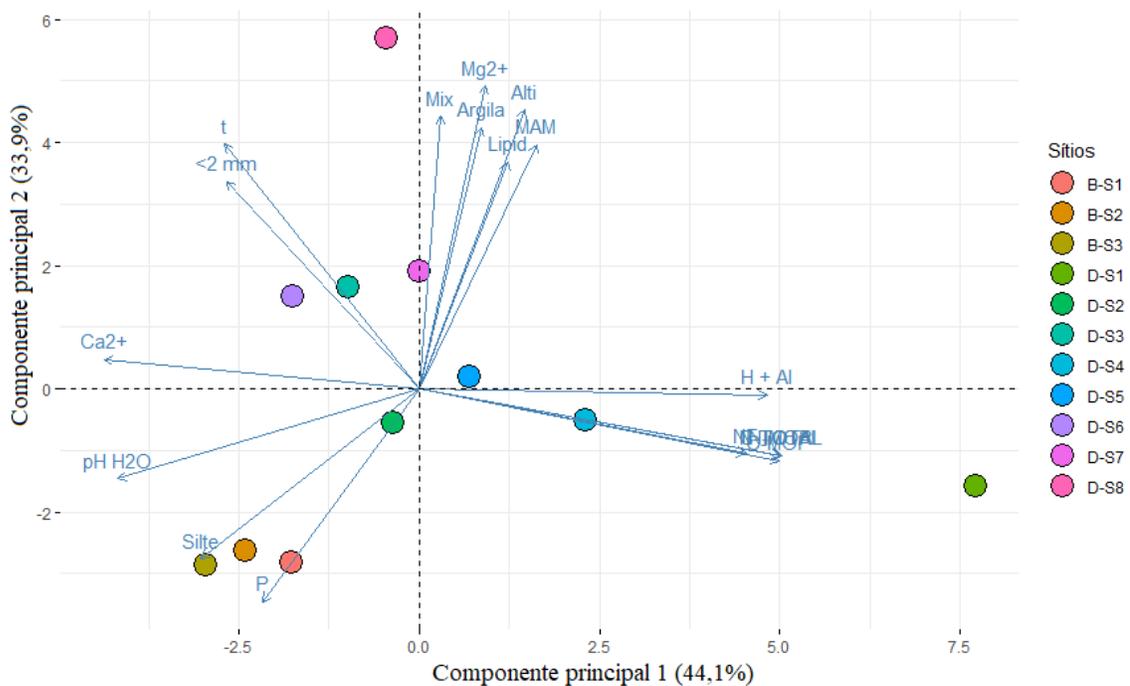


Fonte: elaborado pelo autor.

As dispersões gráficas da análise de componentes principais (PCA) para a MOP e MOAM, ambas utilizando conjunto de atributos físicos e químicos, assim como os sítios, são apresentados nas figuras 14 e 15, respectivamente. As variáveis selecionadas na PCA procedida para a MOP explicaram 78% da variabilidade entre os sítios, sendo 44,1 % no componente principal 1 (CP 1) e 33,9 % no componente 2 (CP 2). Lipídios e marcadores de atividade microbiana foram agrupados

com Mg^{2+} , argila, compostos orgânicos mistos de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (Mix) e a altitude dos sítios de Demay Point. Os teores de C e N das frações MOP, MOAM e total, compostos alifáticos e compostos nitrogenados foram associados a comunidades mistas de solos mais distantes das geleiras (Figura 14).

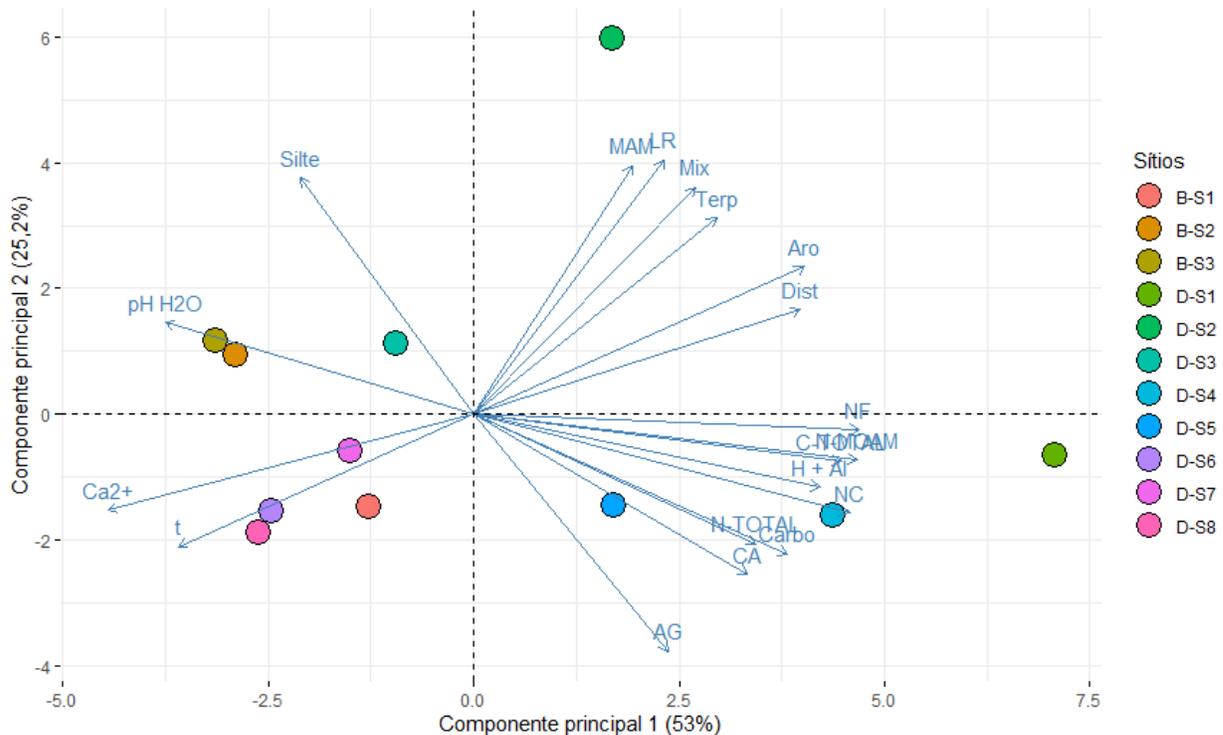
Figura 14 – Dispersão gráfica em componentes principais dos atributos físicos e químicos do solo e de compostos orgânicos da matéria orgânica particulada (MOP) dos sítios de Demay Point (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Baranowski (B-S1, B-S2 e B-S3) e Telephone Point (T-S1, T-S2 e T-S3) da ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima. t: capacidade de troca catiônica efetiva; P: fósforo disponível; <2 mm: granulometria do solo menor que 2 mm; Ca^{2+} trocável; Mg^{2+} : Mg trocável; H+Al: acidez potencial; pH H_2O : potencial hidrogeniônico em água; MAM: marcador de atividade microbiana; Alti: altitude; Lipid: lipídios; Ali: compostos alifáticos; C-MOP: carbono da MOP; N-MOP: nitrogênio MOP; C-total: carbono total; N-TOTAL: nitrogênio total; Mix: funções mistas de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio; e NF: funções nitrogenadas



Fonte: elaborado pelo autor.

No caso da MOAM, os componentes principais, após seleção de variáveis, explicaram 78,2 %, sendo 53% no primeiro (componente principal 1) e 25,2 % no segundo (componente principal 2). Na dispersão gráfica dos sítios, constatou-se que os quatro quadrantes da Figura 11 estão ocupados por um ou por grupos de sítios. No quadrante superior esquerdo constatou-se o agrupamento de solos nus (sítios: drenados/B-S2, hidromórficos/B-S3 e úmidos estriados/D-S3, respectivamente), que apresentam em comum teores de silte e argila. No quadrante superior direito, constatou-se a presença do sítio D-S2 (solo poligonal), o qual está associado a atividade microbiana, funções mistas, derivados de lignina, terpenos e compostos aromáticos. No quadrante inferior direito, observou-se os sítios de solos bem drenados com comunidades vegetais (D-S1 e D-S4) ou hidromórficos com tapetes de musgos (D-S5). Nesses casos, houve agrupamento com os teores de C, N, compostos nitrogenados, carboidratos, areia grossa, acidez potencial e compostos alifáticos cíclicos. Nos sítios mais próximos das geleiras ou mais recentemente expostos (Baranowski) foram apenas relacionados aos atributos químicos e físicos: Ca^{2+} , pH em água, CTC e silte, todos no quadrante inferior esquerdo (Figura 15).

Figura 15 – Análise de componentes principais (PCA) dos atributos físicos, químicos e compostos orgânicos da matéria orgânica associada a minerais (MOAM) nos sítios de Demay Point (sítios D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Baranowski (sítios B-S1, B-S2 e B-S3) e Telephone Point (sítios T-S1, T-S2 e T-S3) da ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima. As abreviações da PCA são: t: capacidade de troca catiônica efetiva; Ca^{2+} trocável; Mg^{2+} : Mg trocável; H+Al: acidez potencial; pH H₂O: potencial hidrogeniônico em água; MAM: marcador de atividade microbiana; Lipid: lipídios; CA: compostos alifáticos; Aro: compostos aromáticos; C-MOAM: carbono da MOAM; N-MOAM: nitrogênio MOAM; C-total: carbono total; N-TOTAL: nitrogênio total; Mix: funções mistas de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio; NF: funções nitrogenadas; NC: compostos nitrogenados; Carbo: carboidratos; Terp: terpenos; Dist: distância da geleira; e LR: derivados de lignina



Fonte: elaborado pelo autor.

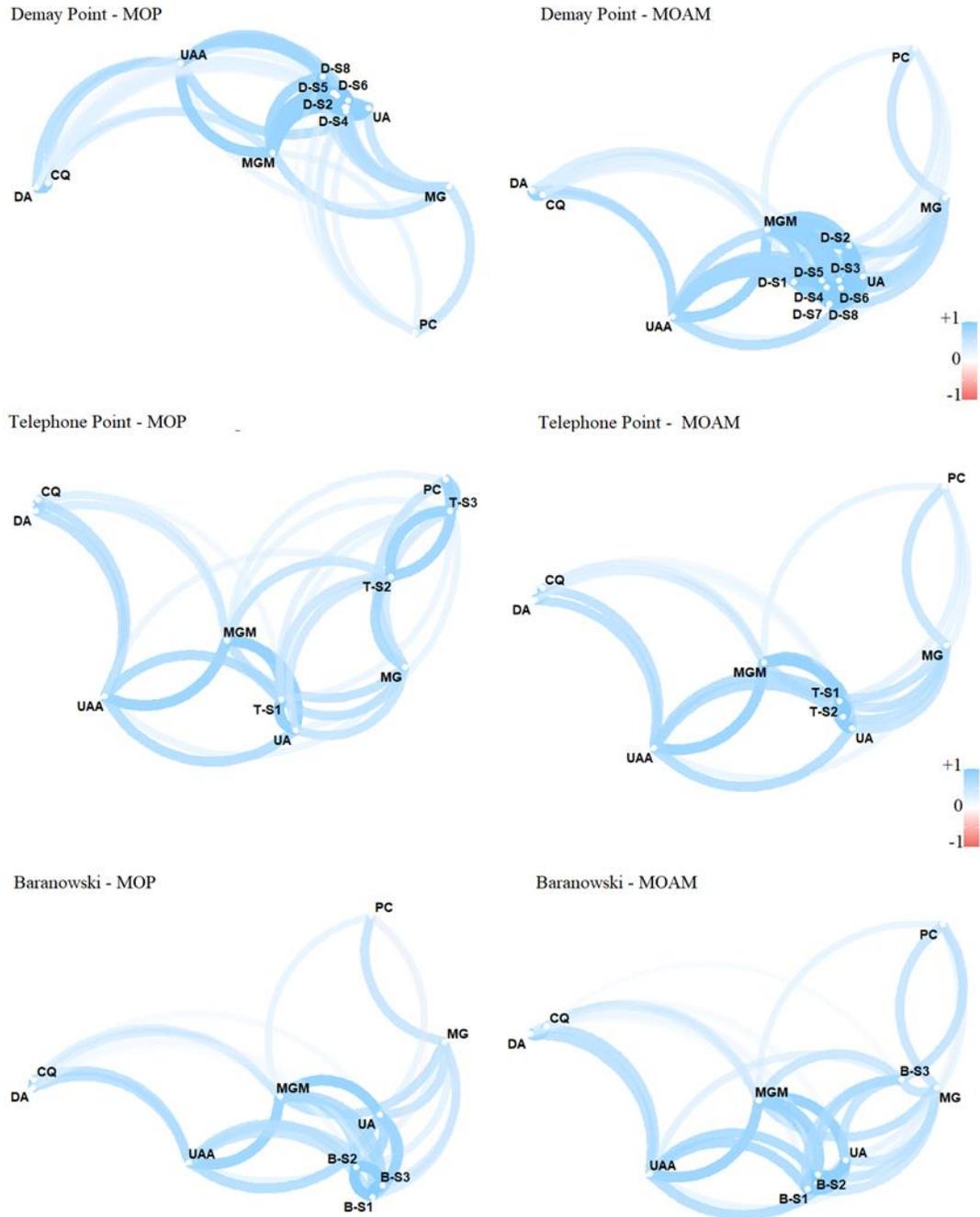
A rede de coeficientes de correlação de Pearson mostrou que todos os tipos de vegetais e líquens contribuíram para a matéria orgânica do solo nos sítios dos recuos estudados, pois os coeficientes de correlação foram positivos (Figura 16). Quase todos os sítios de Demay Point compostos bioquímicos da MOP são semelhantes, o que ocasionou a sobreposição de muitos nós dos sítios, na rede de correlações. Por aproximação dos pontos na rede de correlações, os compostos orgânicos de *Usnea antarctica* são os mais presentes na MOP, correlacionando significativamente com os sítios ($r > 0.90$ $p < 0.001$). A segunda maior contribuição é proveniente

de musgos moribundos ($r > 0.86$ $p < 0.001$), seguido por *Usnea aurantiacoatra* ($r = 0.69/0.73$ $p < 0.001$) e musgos ($r = 0.61/0.71$ $p < 0.05$). *D. antarctica*, *C. Quitensis* e *P. crispa* apresentaram baixos coeficientes de correlações muito fracas com MOP ($r \leq 0.35$ $p > 0.05$). Na MOAM, a contribuição das comunidades vegetais e líquens foi semelhante ao ocorrido na MOP, porém os musgos moribundos contribuíram mais fortemente com a MOAM ($r = 0.89/0.90$ $p < 0.001$).

Em Telephone Point, os três sítios (T-S1, T-S2 e T-S3) receberam contribuições distintas de material orgânico na MOP, distanciando os pontos de conexões entre eles (Figura 16). T-S1 recebeu contribuições de musgos moribundos ($r = 0,89$ $p < 0,001$) e líquens (*U. aurantiacoatra* ($r = 0,79$ $p < 0,001$), *U. antarctica* ($r = 0,93$ $p < 0,001$)) apresentaram correlações mais fortes e uma pequena contribuição não significativa de *C. quitensis* ($r = 0,31$ $p > 0,05$). O sítio T-S2 foi significativamente correlacionado a musgos ($r = 0,81$ $p < 0,001$), considerando também os moribundos ($r = 0,66$ $p < 0,01$), *P. crispa* ($r = 0,87$ $p < 0,001$) e *U. antarctica* ($r = 0,60$ $p < 0,05$), e fracamente com *U. aurantiacoatra* ($r = 0,35$ $p > 0,05$). T-S3 foi fortemente correlacionado a *P. crispa* ($r = 0,83$ $p < 0,001$) e muito fracamente com musgos moribundos ($r = 0,36$ $p < 0,05$). Observa-se, também, uma forte correlação entre T-S3 e T-S2 ($r = 0,87$ $p < 0.001$); T-S2 e T-S1 ($r = 0,62$ $p < 0,01$); fracamente entre o ponto de amostragem T-S3 e T-S1 ($r = 0,45$ $p > 0,05$). Na MOAM, os sítios T-S1 e T-S2 possuem correlações fortes com musgos moribundos ($r = ,89$ $p < 0,001$) e líquens (*U. aurantiacoatra* ($r = 0,77$ $p < 0,001$) e *U. antarctica* ($r = 0,95$ $p < 0,001$)), com material orgânico semelhante a MOP do ponto de amostragem T-S1. Já o ponto de amostragem T-S3 não aparece na rede de correlação da MOAM.

Os compostos bioquímicos da MOP nos sítios B-S1 e B-S3 de Baranowski apresentaram teores semelhantes, com elevados coeficientes de correlação com a composição dos líquens (*U. aurantiacoatra* ($r = 0,65$ a $0,67$ $p < 0,01$) e *U. antarctica* ($r = 0,84$ a $0,85$ $p < 0,001$)) e, em B-S2, com *U. aurantiacoatra* ($r = 0,71$ $p < 0,001$). Já os compostos bioquímicos da MOAM, em B-S1 se assemelham a B-S2, correlacionando com os compostos de musgos ($r = 0,61$ $p < 0,05$ a $0,88$ $p < 0,001$) e de líquens ($r = 0,80$ a $0,95$ $p < 0,001$). O sítio B-S3 apresentou baixos valores de coeficientes com os compostos da vegetação superior, sendo maiores com musgos ($r = 0,64$ a $0,66$ $p < 0,05$), *P. crispa* ($r = 0,67$ $p < 0,05$) e *U. antarctica* ($r = 0,69$ $p < 0,05$). *D. antarctica*, *C. quitensis* e *P. crispa* foram as espécies vegetais que menos contribuíram para a matéria orgânica do solo, com $r \leq 0,35$ ($p > 0,05$) (Figura 16).

Figura 16 – Rede de correlação de Pearson da bioquímica da matéria orgânica da vegetação, líquens e solo (Frações MOP e MOAM) nos sítios dos recuos Demay Point (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Telephone Point (T-S1, T-S2 e T-S3) e Baranowski (B-S1, B-S2 e B-S3) da ASPA 128, Península Antártica. Os vegetais e líquens foram abreviados em: CQ: *C. quitensis*; DA: *D. antarctica*; MG: musgo; MGM: musgo moribundo; PC: *P. crispa*; UA: *U. antarctica*; e UAA: *U. aurantiacoatra*. Mais detalhes das correlações e significâncias encontra-se nas figuras suplementares (FS3 e FS4) e o mapeamentos dos compostos orgânicos na tabela suplementar (Tabela 12 - TS6 e tabela 13 - TS7).



Fonte: elaborado pelo autor.

3.4 Discussão

A retração das geleiras proporcionou a maior estabilização das frações de calhaus, cascalho e das partículas de areia, silte e argila nos sítios mais distantes. Em Demay Point, que é um recuo de maior tempo exposição e altitude, observou-se um aumento nas frações maiores de 4 mm, as quais estão se deslocando da geleira em direção ao mar (do sítio D-S8 para o D-S1). Já em Baranowski e Telephone Point (recuos mais jovens e ou de baixa altitude) apresentaram aumento de frações maiores que 20 mm, nesse caso das geleiras em direção ao mar (do sítio S3 para o S1). Observou-se que, com a retração das geleiras, houve um aumento das partículas de areia fina em todos os recuos. A movimentação da massa de solo por crioturbação ou por ciclos de congelamento e descongelamento podem ter aumentado as frações de cascalho na camada de 0,00 – 0,10 m, especificamente nos sítios mais distantes das geleiras. Uma característica típica de morfogênese periglacial (como erosão e solifluxão), onde a rocha é esfacelada, quebrada, acumulada na superfície, redistribuída e misturada com os produtos do intemperismo físico (FARIA, 2010; FRANCELINO, 2004).

Os sítios localizados nas altitudes mais elevadas e com as maiores quantidades de cascalhos > 4 mm (D-S1, D-S4 e D-S5 de Demay Point) apresentaram os máximos teores de C orgânico (C) e N total (N) associados às comunidades vegetais dominadas por criptógamas e criptoendolíticas. Este fato demonstra a importância de cascalhos para a fixação e fonte térmica para essas comunidades vegetais, principalmente criptoendolíticas, e, conseqüentemente, nos aumentos dos reservatórios de C e N no solo. As criptógamas e criptoendolíticas tem sido descritas como as principais contribuidoras de C na Antártica (HOPKINS *et al.*, 2009) e responsáveis pelas maiores produtividades primárias (ARENZ; BLANCHETTE, 2011). Por outro lado, sítios em baixas altitudes e com acesso de animais como pinguins, elefantes marinhos e lobos marinhos, ocupados por *D. antarctica*, *P. crista* e *C. quitensis*, e também com frações de calhaus > 20 mm (sítios B-S1 e T-S1 de Baranowski e Telephone Point, respectivamente) também apresentaram maiores teores de C e N. Dessa maneira, o aumento do fluxo de animais (principalmente aves) e da densidade vegetal em solos com maior intemperismo (ambientes periglacial) promoveram o aumento dos teores de C e N pelo aumento da deposição de matéria orgânica (ABAKUMOV; MUKHAMETOVA, 2014; CASTRO *et al.*, 2021).

Os recuos mais jovens apresentaram solos com domínio de textura franco arenosa, conforme a maioria dos solos da Antártica (DO VALE LOPES *et al.*, 2022; SIQUEIRA *et al.*, 2022). Os solos de Demay Point apresentaram textura de areia franca à franco argilosa indicando solos mais intemperizados provavelmente por meio da pedogênese (SPINOLA *et al.*, 2017). No entanto, C e N da MOP e da MAOM não foram agrupadas na análise de componentes principais (PCA) com a textura e sim com a ocupação biológica, mostrando a importância da biota para o acúmulo da MOS (CASTRO *et al.*, 2021).

Já em Demay Point, nos sítios com acesso restrito a animais, porém frequentados por aves (Skuas e com comunidades vegetais mais densas, também foram observados os maiores teores de C e N nas frações MOP e MOAM. No caso de Demay Point, o pH mais ácido (quando comparado aos solos mais alcalinos da Antártica), provavelmente, foi influenciado pela ocupação de comunidades vegetais, em especial líquens e musgos, os quais produziram ácidos orgânicos. A presença do Al trocável promoveu a maior sorção de C e N (MCKNIGHT *et al.*, 1992; ZDANOWSKI; ZMUDA; ZWOLSKA, 2005). Os maiores teores de N na MOAM de todos os sítios de Demay Point, além da contribuição de plantas e animais, pode ter também como origem a fixação de N atmosférico por microrganismos (cianobactérias) (MAKHALANYANE *et al.*, 2015) ou mesmo pelo derretimento de neve e gelo (HOLLY *et al.*, 2020). Nem todos os sítios de Demay Point possuem compostos nitrogenados na MOP, sugerindo outra fonte de N.

Os sítios com os maiores teores de N (T-S1, D-S1, D-S4, D-S5 e D-S7) continham maior abundância e qualidade da MOS (teores de C, carboidrato, aminoácidos e compostos nitrogenados). A disponibilidade de N provavelmente aumentou a quantidade e qualidade dos resíduos orgânicos (CAMPBELL *et al.*, 1991; SJÖGERSTEN *et al.*, 2018). Os aminoácidos foram abundantes apenas em sítios mais distantes das geleiras (D-S1 e T-S1), principalmente na MOAM, provavelmente produzidos por microrganismos para a proteção contra radiação UV, uma vez que as comunidades vegetais não apresentaram em sua biomassa (exceto para a espécie *C. quitensis* que produziu em pequena concentração – Figura 3) (ROBINSON; WASLEY; TOBIN, 2003). A mineralização da matéria orgânica (MO) qualitativa aumenta a fonte de N para a vegetação, impactando a produtividade primária (MANCHEN *et al.*, 2004; MENGEL, 1996), sendo verificado, visualmente, a maior densidade vegetal em sítios com maiores teores de C e qualidade da MOS. Assim, nota-se interações entre N, microrganismos, animais e criptoendolíticas com o aumento da quantidade e qualidade da MOP.

Os tecidos das plantas superiores apresentaram maior abundância de carboidratos, lipídios e derivados de lignina. *D. antarctica*, *C. quitensis* e *líquens* foram muito abundantes em carboidratos. As plantas que passam por ciclos de congelamento e descongelamento em solos bem drenados ou secos, podem armazenar carboidratos em seus tecidos, os quais favorecem a proteção contra ressecamento nas estações mais quentes com o aumento da radiação UV CHAPIN III, *et al.*, 1986; ROBINSON; WASLEY; TOBIN, 2003). As plantas de ambientes úmidos ou em solos hidromórficos, no caso musgos e algas (*P. crispata*), investem mais na síntese de terpenos, encontrados exclusivamente nas comunidades criptoendolíticas e criptógamas. O líquen *U. aurantiacoatra* apresentou abundâncias semelhantes de lipídios, carboidratos e derivados de lignina. Os líquens de zonas temperadas, subtropical e tropicais são reconhecidos por não possuírem lignina (ZAVARZINA *et al.*, 2010). No entanto, neste estudo (Antártica Marítima), foi encontrado, uma expressiva abundância de derivados de lignina na espécie *U. aurantiacoatra*. Para a ocorrência de lignina nos resultados da análise, tanto para plantas superiores quanto para líquens hipotetiza-se que:

(i) a técnica de termoquimólise (TMAH) pode ter promovido a complexação de carboidratos e proteínas em alta temperatura (300 °C) e, como produto, houve a formação de moléculas semelhantes a lignina em temperaturas acima de 60 °C (ROBBINS, 1983). Acredita-se que esta hipótese seja a mais viável para a Antártica, pois, até então, não foram identificadas plantas sintetizadoras de lignina (BURKINS *et al.*, 2000; HOPKINS *et al.*, 2006, 2009). Porém, os resultados da TMAH apontam a possibilidade de formação de lignina em plantas da Antártica, pois os ingredientes básicos (carboidratos, aminoácidos-Proteínas e compostos aromáticos) estão à disposição, à espera do aumento de temperatura, radiação UV e uma mutação fisiológica da vegetação.

(ii) A vegetação inferior (musgos e líquens) é capaz de sintetizar lignina? Estudos realizados em musgos e líquens de Tundra em condições climáticas subpolares (Alasca) encontraram conteúdos de lignina nos tecidos dessas espécies criptoendolíticas (CHAPIN III, *et al.*, 1986). Assim, a vegetação inferior em condições antárticas poderia ser capaz de sintetizar lignina, diferentemente daquelas localizadas em regiões temperadas, subtropicais e tropicais, pois a lignina não estaria vinculada a lenhosidade das espécies superiores (III; MCKENDRICK; JOHNSON, 1986).

Quanto aos compostos orgânicos do solo, verificou-se a elevada abundância de lipídios em sítio de solos sem ou com pouca ocupação vegetal (poligonais e estriados), solos hidromórficos (moraina) na MOP e em sítios próximos das geleiras como observado no caso da MOAM, todos em Demay Point. Atribuiu-se aos microrganismos como a principal fonte de lipídios, como também identificado por Chen *et al.* (2019), o qual identificou lipídios microbianos de cadeia longa em sedimentos de lagos. A origem lipídica foi confirmada pela PCA, pois houve o agrupamento de marcadores de atividade microbiana com os lipídios e a altitude (Figura 7). Acredita-se que solos hidromórficos, condição dependente do derretimento da geleira como fonte de umidade, sejam semelhantes às condições de sedimentos de lagos, como os observados por Chen *et al.* (2019) que observaram a presença de lipídios. Além disso, quando os solos hidromórficos são drenados e não vegetados, os lipídios podem ser conservados, permanecendo abundantes. Esses resultados apoiam o modelo do legado lacustre para origem da MOS (ABAKUMOV *et al.*, 2022; ABAKUMOV; ALEKSEEV, 2018b), o que também pode ser atribuído ao caso em questão.

Nota-se também, uma rápida redução de lipídios com a ocupação vegetal, de aproximadamente 45 % na MOP e 80% na MOAM em sítios com criptógamas e criptoendolíticas, o que também foi observado por Chen *et al.* (2019). A redução de lipídios promoveu a perda da qualidade da matéria orgânica do solo com a redução de compostos alifáticos, devido ao aumento da abundância de biopolímeros na MOAM e derivados de lignina e terpeno em ambas as frações MOP e MOAM. Biopolímeros, lignina e terpenos são compostos que estão bem vinculados às plantas e, na Antártica, prevê-se o aumento da aromaticidade nas plantas, principalmente pelo tempo mais prolongado de exposição a raios UV, especialmente nos maiores recuos das geleiras, e formação de ceras e flavonoides (ROBINSON; WASLEY; TOBIN, 2003).

A perda de qualidade da MOS foi confirmada pela caracterização química dos compostos orgânicos. A retração das geleiras promoveu a redução de compostos alifáticos e aumentou os alifáticos cíclicos e os aromáticos. Encontrou-se uma aromaticidade máxima de 33% na MOAM e 35% na MOP, valores bem próximos aos encontrados em regiões subantárticas (20% à 30%), nesse caso usando a técnica de ressonância magnética nuclear – RMN (ABAKUMOV, 2017; ABAKUMOV *et al.*, 2022; ABAKUMOV; ALEKSEEV, 2018b; BEYER *et al.*, 1995). Resultados semelhantes foram encontrados em crioconitos transportados pelo ar e água para as geleiras nas zonas de influência do Ártico (Grøn fjorden area - Aldegonda glacier region; Yamal peninsula) e Antártica (Ilha King-George), com 66 e 71% de alifáticos e 34 e 29% de aromáticos,

respectivamente (POLYAKOV; ABAKUMOV, 2019). Esses resultados indicam um padrão de aromaticidade da matéria orgânica sob influência criogênica, o que pode refletir positivamente na formação de agregados e melhorar a estruturação do solo (NANDWA, 2001) nos recuos das geleiras com a retenção de frações aromáticas por Al (BUURMAN; JONGMANS, 2005). Essas mudanças na composição química da MOS sugerem a sucessão de um ambiente lacustre para um terrestre, identificados pelo aumento da recalcitrância (SCHINDLER *et al.*, 2017).

Baseado nos resultados e na discussão anteriores, sugere-se que, na Antártica, a progressão das retrações das geleiras e o maior tempo de exposição dos ambientes periglaciais contribuirão para o aumento da aromaticidade derivada de plantas e a polimerização de funções oxigenadas (ex.: lipídios) e hidrogenadas (ex.: terpenos e hidrocarbonetos), sejam elas de origem vegetal ou não. A alta abundância de cadeias alifáticas pode ser um precursor para a formação de cadeias alifáticas cíclicas e aromáticas (ALLEMANN, 2008; ELLIS *et al.*, 1996; GONG *et al.*, 2020). Abakumov *et al.* (2022) sugerem que a grande abundância de compostos alifáticos na Antártica possa ser efeito da técnica de RMN. Não se descarta a possibilidade de que a termoquimólise (TMAH) também gere compostos alifáticos quando da quebra térmica, mas verificou-se que a origem alifática, ao longo do recuo, primeiramente é microbiana (lipídios) (Figura 4) e, posteriormente, de plantas (lipídios e terpenos) (Figura 3). Além disso, sugere-se que parte da origem de hidrocarbonetos, seja por produtos de reações de CH₄, CO₂, hidrogênio e água nas geleiras ou mesmo durante os ciclos de congelamento e descongelamento dos ambientes não glaciais, formem macromoléculas alifáticas (GLEIN; ZOLOTOV, 2020). Com isso processos de hidrogenação podem resultar na formação de fragmentos alifáticos, inclusive nos ácidos húmicos (POLYAKOV; ABAKUMOV, 2019).

Na análise da rede de coeficientes de correlação aplicada ao mapeamento dos compostos orgânicos, observou-se uma maior transferência de material orgânico de musgos e líquens para o solo, especificamente nas frações MOP e MOAM de todos os sítios e recuos (Figura 8). Isso indica que as plantas inferiores da Antártica são responsáveis pela maior transferência de matéria orgânica para o solo entre as comunidades vegetais, contribuindo assim para o aumento dos reservatórios de carbono (C) no perfil do solo (BOY *et al.*, 2016; MARFENINA; NIKITIN; IVANOVA, 2016; SIMAS *et al.*, 2007). No caso de *C. quitensis*, *D. antarctica* e *P. crispa*, verificou-se que essas espécies se conectaram de forma fraca com a matéria orgânica do solo (MOS). Provavelmente, essa baixa conexão está relacionada à ocorrência limitada e à baixa

biomassa dessas espécies, o que justifica sua pouca contribuição para a formação da MOS. No ano de 2010, os recuos estudados apresentaram uma pequena área de cobertura, com apenas 2,43% para *D. antarctica* e as subformações de musgos (PEREIRA *et al.*, 2010). Em contraste, musgos e líquens juntos contribuíram com 15,74% da área total de estudo, o que representa quase 6,5 vezes mais área coberta do que as gramíneas (PEREIRA *et al.*, 2010). Esses números mostram que musgos e líquens desempenham um papel mais significativo do que as plantas superiores na contribuição para a matéria orgânica do solo na ASPA 128.

Em Demay Point, verificou-se que os musgos moribundos e os líquens desempenham um papel fundamental na transferência de matéria orgânica para o solo (Figura 16). Em todos os recuos, a espécie *U. antarctica* mostrou a maior correlação na rede de coeficientes, estabelecendo conexões significativas com os sítios. Essa espécie é amplamente distribuída na Antártica e é reconhecida como uma espécie "enfermeira", pois desempenha um papel importante na melhoria do ambiente e no estabelecimento e sobrevivência de outras plantas, possuindo alta significância ecológica (FERRARI *et al.*, 2021; MOLINA-MONTENEGRO *et al.*, 2013). Esses estudos ressaltam a contribuição a longo prazo das comunidades criptoendolíticas para o acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS). Assim, a origem da MOS nos sítios das comunidades criptoendolíticas sugere o modelo lacustre sucedido pelo endolítico, que envolve a redução de lipídios microbianos e o aumento de compostos de origem criptoendolítica. Esses processos apoiam as origens e fluxos de MOS em ecossistemas de alta altitude, como em Demay Point, assim como nos Vales Secos da Antártica (BURKINS *et al.*, 2000).

Notou-se uma importante contribuição da *P. crispa* nos recuos mais recentes e em morainas nas menores altitudes, o que pode estar associado a maior umidade destes sítios, os quais recebem água de degelo de sítios de altitudes mais elevadas, alinhando-se a uma fonte primária de matéria orgânica, seguindo o modelo lacustre (HOPKINS *et al.*, 2009). Neste contexto, *P. crispa* é a espécie vegetal pioneira na sucessão vegetal nas áreas de menores altitudes da ASPA 128, assim como verificado em áreas ornitogênicas (TATUR; MYRCHA; NIEGODZISZ, 1997). *C. quitensis* e *D. antarctica* somente apresentaram maiores contribuições em sítios periglaciais e com maior tempo de exposição da superfície, sugerindo que a participação da vegetação superior na formação da MOS na Antártica será lenta. Tal condição pode representar a sucessão do modelo criptoendolítica para a MOS contemporânea nos recuos da ASPA 128, pois requer solos mais desenvolvidos e férteis para o seu desenvolvimento (KOMARKOVA *et al.*, 1985; TATUR *et al.*,

1996). Assim, atualmente, plantas criptoendolíticas são pioneiras na ocupação do solo e promovem as maiores mudanças na matéria orgânica das paisagens não glaciais da ASPA 128.

A matéria orgânica particulada (MOP) presente no recuo Baranowski, localizado em sítios com menores altitudes, apresenta uma origem semelhante à encontrada em Demay Point, situado em altitudes mais elevadas. Essa semelhança sugere a possibilidade de que o material particulado da Península Demay seja transferido para Baranowski através de processos eólicos ou fluviais (Figura 9). Essa condição resulta em padrões distintos de distribuição da matéria orgânica, os quais estão relacionados tanto à geografia quanto à elevação dos sítios e recuos estudados (BURKINS, VIRGINIA, *et al.*, 2000). A análise aponta que a movimentação de sedimentos e o transporte fluvial para Baranowski podem ter origem nos sítios D-S6, D-S7 e D-S8 de Demay Point (Tabela 5). Esse processo de transferência de matéria orgânica de recuos em altitudes mais elevadas para aqueles em altitudes mais baixas também foi observado entre sítios de maior altitude para sítios de menor altitude dentro do mesmo recuo. Essa dinâmica de transporte de matéria orgânica evidencia a influência das características topográficas e dos processos geológicos na distribuição e acumulação da MOP nas áreas estudadas. Essas informações são relevantes para a compreensão dos ciclos biogeoquímicos e para a ecologia desses ecossistemas, contribuindo para o entendimento dos mecanismos que afetam a fertilidade do solo e o armazenamento de carbono em regiões como a Península Demay e o recuo Baranowski.

Em Telephone Point observou-se elevados coeficientes de correlação entre os sítios T-S3 e T-S2 ao avaliar a MOP, o que indica que há, então, uma maior transferência de matéria orgânica entre sítios adjacentes e menor entre sítios mais distantes (T-S3 para T-S1). A transferência de matéria orgânica também foi verificada na MOAM do recuo Baranowski, do sítio B-S3 para B-S2 e B-S1. Nesses recuos de menores altitudes, a distribuição de matéria orgânica de origem eólica e fluvial é importante, principalmente a fluvial, devido a formação de lagos (ANDRIUZZI *et al.*, 2018; CHOU *et al.*, 2018). Tal condição é diferente dos vales secos da Antártica, onde a distribuição eólica da matéria orgânica torna-se a mais importante no aumento da conectividade entre os componentes dos ecossistemas (BURKINS; VIRGINIA; WALL, 2001; ŠABACKÁ *et al.*, 2012).

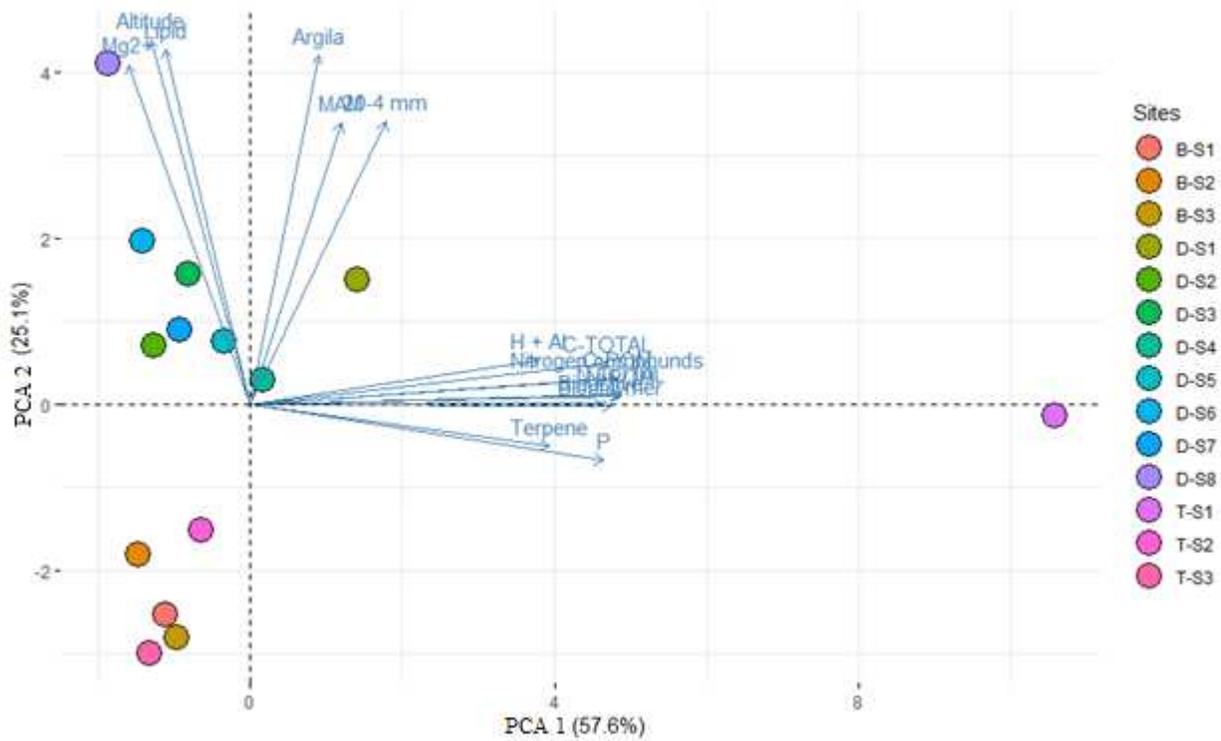
3.5 Conclusões

A análise por meio da termoquimólise (TMAH) foi efetiva para a caracterização bioquímica dos compostos orgânicos, principalmente na identificação de cadeias alifáticas, alifáticas cíclicas e aromáticas – com resultados semelhantes a técnicas de ressonância magnética nuclear realizadas em zonas de influência polar. No entanto, promoveu a reação de funções orgânicas com cadeias aromáticas durante a quebra térmica da matéria orgânica formando compostos semelhantes a derivados de lignina. A síntese de derivados de lignina pela TMAH permitiu inferir que o aumento do aquecimento global e a progressão das retrações das geleiras podem, no futuro, promover reações bioquímicas entre carboidratos e aminoácidos na síntese de lignina, já presentes na espécie *C. quitensis* (Figura 10).

A retração das geleiras promove, inicialmente, a formação de compostos alifáticos, principalmente lipídios microbianos. Conforme a retração das geleiras progridem, o solo fica mais estabilizado e a comunidade vegetal ocupa, promovendo o aumento de compostos alifáticos cíclicos e aromáticos, devido a substituição de lipídios microbianos por terpenos, carboidratos, funções nitrogenadas e aminoácidos. Por fim, o aumento da acidez do solo e as plantas inferiores (criptógamas e criptoendolíticas) são os principais agentes transformadoras da matéria orgânica e dos aumentos dos teores de carbono em solos não-ornitogênicos da ASPA 128, na Antártica Marítima.

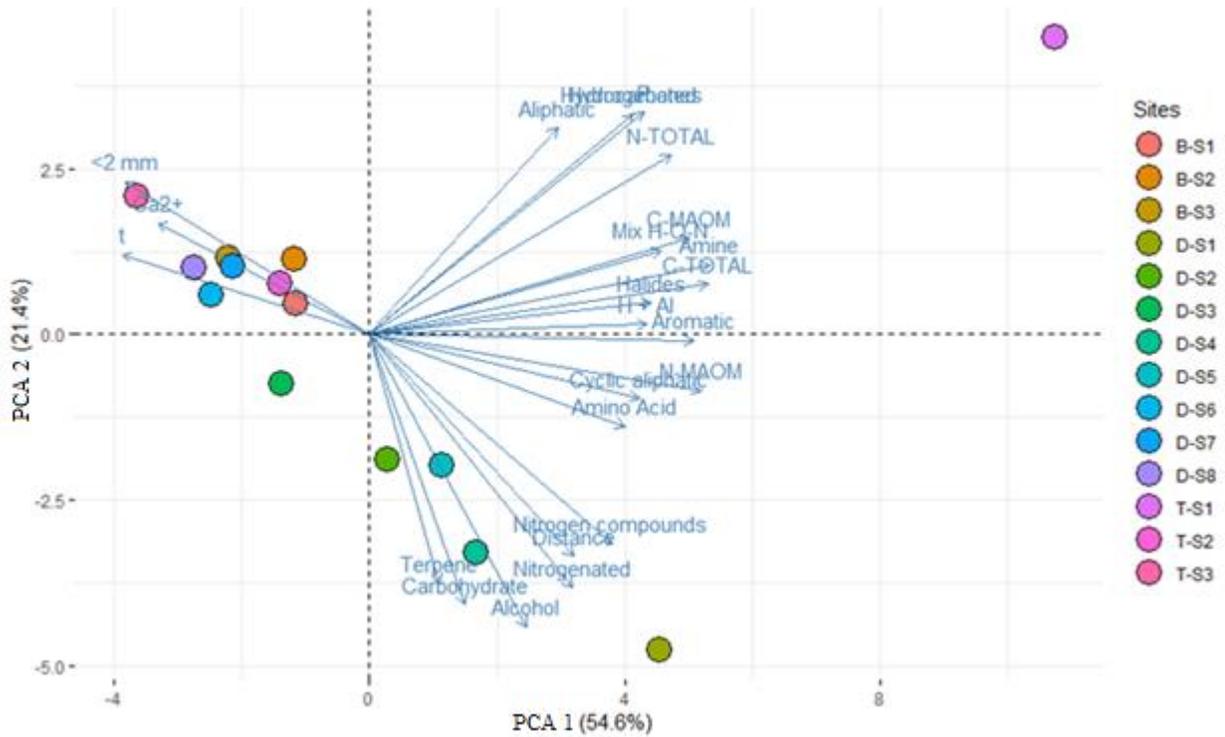
3.6 Material suplementar

Figura 17 – Figura suplementar 2 (FS2) - Análise de componentes principais (PCA) dos atributos físicos, químicos e compostos orgânicos da matéria orgânica particulada (MOP) nos sítios dos recuos Demay Point (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8) e Baranowski (B-S1, B-S2 e B-S3) da ASPA 128, Península Antártica, incluindo o solo ornitogenico do recuo Telephone Point (T-S1, T-S2 e T-S3).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 18 – Figura suplementar 3 (FS3) - Análise de componentes principais (PCA) dos atributos físicos, químicos e compostos orgânicos da matéria orgânica particulada (MOAM) nos sítios dos recuos Demay Point (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8) e Baranowski (B-S1, B-S2 e B-S3) da ASPA 128, Península Antártica, incluindo o solo ornitogenico do recuo Telephone Point (T-S1, T-S2 e T-S3).



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Tabela suplementar 2 (TS2) – Caracterização das moléculas extraídas de resíduos vegetais da ASPA 128, Antártica Marítima e tempo de retenção pela técnica de termoquimólise (THMA)

Organismo	Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
<i>U. antarctica</i>	Butane, 1,2,4-trimethoxy-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Aliphatic	4,13
	Nonane, 5-butyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	6,07
	Fructofuranose, 2,6-anhydro-1,3,4-tri-O-methyl-, .beta.-d-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	6,98
	2,4,5,6,7-Pentamethoxyheptanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Aliphatic	8,84
	9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86
<i>D. antártica</i>	Tetracosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	31,47
	Fructofuranose, 2,6-anhydro-1,3,4-tri-O-methyl-, .beta.-d-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	7,00
	Benzene, 4-ethenyl-1,2-dimethoxy-	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	7,06
	1,2,4-Trimethoxybenzene	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	7,11
	2-Propenoic acid, 3-(3,4-dimethoxyphenyl)-, methyl ester	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	15,59
	8-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	23,53
	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	24,56
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	25,55
	Docosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	28,44
	Tetracosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	32,09
	1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	33,78
	Hexacosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	35,52
<i>S. uncinata</i>	Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	11,83
	Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	12,64
	Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,06
	Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,94

Organismo	Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
<i>P. crisper</i>	Nonacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	21,85
	Heptadecane, 8-methyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	12,66
	Nonacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,06
	Heptadecane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	21,86
	Octacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	31,47
	Nonacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	33,22
Musgo	Nonane, 5-(2-methylpropyl)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	11,85
	Nonacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,94
	5,5-Diethylpentadecane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,94
	Eicosanoic acid	Oxygenated	Lipid	carboxil acid	Aliphatic	17,11
Musgo morimbudo	Decane, 3-methyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	4,02
	Nonane, 5-(2-methylpropyl)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	6,08
	3-Hydroxymandelic acid, dimethyl ether, methyl ester	Oxygenated	Others	Ether/Esters	Aromatic	9,40
	8-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86
	Octadecanoic acid	Oxygenated	Lipid	carboxil acid	Aliphatic	21,28
	Methyl 18-methylnonadecanoate	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	24,53
	1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	26,48
	Docosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	28,44
	2-Pyrrolidone-5-carboxylic acid, N-methyl, methyl ester	MIX	Amino Acid	Amine	Cyclic aliphatic	6,79
	Myo-Inositol, 1,2,3,4,5,6-hexa-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Alcohol	Cyclic aliphatic	9,17
<i>C. quitensis</i>	Benzenepropanoic acid, 3,4-dimethoxy-, methyl ester	Oxygenated	Lignin route	Ether/Esters	Aromatic	12,29
	2-Propenoic acid, 3-(3,4-dimethoxyphenyl)-, methyl ester	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	15,64
	Hexadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	17,69
	Methyl 11-methoxyhexadecanoate	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,17
	7-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86

Organismo	Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
	6,9-Octadecadienoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	21,72
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	23,51
	17-Octadecynoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	24,55
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	26,39
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	26,97
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	27,58
	Docosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	28,44
	1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	30,27
	Tetracosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	32,10
	Hexacosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	35,52
	1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	37,08
	Butane, 1,2,4-trimethoxy-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Aliphatic	4,16
<i>U. aurantiaco-atra</i>	1,2,4-Trimethoxybenzene	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	7,12
	2,4,5,6,7-Pentamethoxyheptanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Aliphatic	8,86
	9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Tabela suplementar 3 (TS3) – Caracterização das moléculas extraídas da matéria orgânica do solo nas frações MOP e MOAM da ASPA 128, Antártica Marítima, e tempo de retenção pela técnica de termoquimólise (THMA)

Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
(+)-.alpha.-Tocopherol, O-methyl-	Oxygenated	Vitamin	Esters	Aromatic	37,385
.alpha.-D-Glucopyranoside, methyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	8,631
.beta.-D-Glucopyranoside, methyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	8,445
1,2,4-Trimethoxybenzene	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	7,031
1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester	Oxygenated	Others	Esters	Aromatic	15,152
1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	Oxygenated	Others	Ketone	Cyclic aliphatic	4,439
1,4-Dioxaspiro[2.4]heptan-5-one, 7,7-dimethyl-	Oxygenated	Others	Ether	Cyclic aliphatic	6,714
13-Docosenamide, (Z)-	Mix	MAM	Amide	Aliphatic	33,116
13-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,875
1-Decanol, 2-hexyl-	Oxygenated	Lipid	Alcohol	Aliphatic	27,804
1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	33,804
1-Dodecene	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	5,166
1-Heptadecene	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	19,543
1-Hexadecanol	Oxygenated	Lipid	Alcohol	Aliphatic	15,264
1H-Isoindole-1,3(2H)-dione, 2-methyl-	Mix	NC	Amide	Aromatic	7,801
1-Octadecanol, methyl ether	Oxygenated	MAM	Ether	Aliphatic	18,305
1-Tetradecanol	Oxygenated	Others	Alcohol	Aliphatic	7,439
1-Tridecene	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	7,183
2,3,4-Trimethyl-d-xylose	Oxygenated	Carbohydrate	Aldehyde	Aliphatic	7,603
2,3,4-Trimethyllevoglucosan	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	7,339
2,5-Pyrrolidinedione, 1-methyl-	Mix	MAM	Amide	Cyclic aliphatic	4,357
2-Amino-5,6-dihydro-4,4,6-trimethyl-4H-1,3-oxazine	Mix	Others	Amine	Cyclic aliphatic	4,492

Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
2-Butanone, diethylhydrazone	Nitrogenated	Others	Amide	Aliphatic	5,586
2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	Oxygenated	Others	Enol	Cyclic aliphatic	3,824
2-Dodecene, (E)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	5,375
2H-Pyran-2-one, tetrahydro-	Oxygenated	Others	Ether	Cyclic aliphatic	4,077
2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	Oxygenated	Others	Alcohol	Aliphatic	16,714
2-methylhexacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	22,126
2-Oxazolidinone, 3-amino-5-(4-morpholinylmethyl)-	Mix	Carbohydrate	Amine	Cyclic aliphatic	15,427
2-Pyrrolidone-5-carboxylic acid, N-methyl, methyl ester	Mix	NC	Amide	Cyclic aliphatic	6,835
5,10-Diethoxy-2,3,7,8-tetrahydro-1H,6H-dipyrrolo[1,2-a:1',2'-d]pyrazine	Mix	Bioactive	Amine	Aromatic	16,879
5,5-Diethyltridecane	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	16,06
5-Dodecene, (E)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	5,254
5-Isopropyl-2,4-imidazolidinedione	Mix	Others	Amide	Cyclic aliphatic	15,435
5-Tetradecene, (E)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	6,165
6-Tridecene, (E)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	6,2
9-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)-	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	30,159
9-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,887
Benzene, (1-methylundecyl)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aromatic	13,8
Benzene, 1,4-dimethoxy-	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	5,04
Cyclopentasiloxane, decamethyl-	Oxygenated	Others	Halides	Cyclic aliphatic	4,809
Decane, 1-iodo-	Hydrogenated	Others	Halides	Aliphatic	13,02
Decane, 3,6-dimethyl-	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	9,95
Decane, 3,7-dimethyl-	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	8,448
Docosa-2,6,10,14,18-pentaen-22-al, 2,6,10,15,18-pentamethyl-, all-trans	Oxygenated	Others	Aldehyde	Aliphatic	33,8
Docosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	33,25

Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
Docosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Biop	Esters	Aliphatic	28,454
Dodecane, 2,6,11-trimethyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	9,471
Dodecane, 2-methyl-	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	9,92
Dodecane, 2-methyl-6-propyl-	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	11,661
Dodecane, 4,6-dimethyl-	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	6,068
Dothiepin	Nitrogenated	Others	Halides	Aromatic	12,155
Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	12,003
Eicosane, 7-hexyl-	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	27,821
Eicosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	22,546
Heneicosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	36,566
Hentriacontane	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	12,086
Heptacosane	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	23,92
Heptadecane, 2-methyl-	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	12
Heptadecane, 8-methyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	13,005
Hexacosane	Hydrogenated	Lipid	Hydrocarbones	Aliphatic	23,906
Hexadecane, 1-iodo-	Hydrogenated	Others	Halides	Aliphatic	29,703
Hexadecanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	16,203
Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	25,976
Methyl stearate	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	20,436
Methyl tetradecanoate	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	12,162
Morpholine, 4-octadecyl-	Mix	MAM	Amine	Cyclic aliphatic	15,426
n-Hexadecanoic acid	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	17,083
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	20,536
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	21,406

Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	16,073
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	16,96
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	21,398
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	21,725
Nonadecanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	22,531
Octacosane	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	27,83
Octadecanoic acid	Oxygenated	Lipid	Carboxylic acid	Aliphatic	21,304
Octadecanoic acid, 10-methyl-, methyl ester, (R)-	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	22,57
Octadecanoic acid, 17-methyl-, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	22,524
Octadecanoic acid, 2-(2-hydroxyethoxy)ethyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	21,271
Oleanitrile	Nitrogenated	Others	Amine	Aliphatic	27,796
Pentadecane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	8,438
Pentadecanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	13,375
Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	Oxygenated	Lignin route	Alcohol	Aromatic	8,813
Stigmasta-5,22-diene, 3-methoxy-, (3.beta.,22E)-	Oxygenated	Lipid	Ether	Cyclic aliphatic	39,861
Sulfurous acid, 2-ethylhexyl octadecyl ester	Oxygenated	Others	Esters	Aliphatic	12,101
Tetracosane	Hydrogenated	Lipid	Hydrocarbones	Aliphatic	29,691
Tetracosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	32,113
Tetradecane, 4-methyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,085
Tetratetracontane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	33,225
Trichloroacetic acid, 2-tridecyl ester	Oxygenated	Others	Halides	Aliphatic	6,225
Undecane, 3,8-dimethyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	4,215

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Tabela suplementar 4 (TS4) – Teste t das médias dos teores de C da MOP e MOAM entre os ambientes periglacial (sítio D-S1, T-S1 e B-S1) e proglacial (D-S8, T-S3 e B-S3)

Descrição	Periglacial MOP	Proglacial MOP	Periglacial MOAM	Proglacial MOAM	Periglacial Total	Proglacial Total
Tamanho =	3	3	3	3	3	3
Média =	13,6833	2,1	8,9733	1,4	12,9588	1,796
Variância =	344,1458	0,2203	126,707	0,7987	299,9741	0,1872
Variância =	114,7887	---	42,5019	---	100,0537	---
t =	1,0811	---	1,1617	---	1,116	---
Graus de liberdade =	2	---	2,03	---	2	---
p (unilateral) =	0,1963	---	0,1826	---	0,1902	---
p (bilateral) =	0,3926	---	0,3652	---	0,3805	---
Poder (0.05)	0,2863	---	0,3144	---	0,2983	---
Poder (0.01)	0,103	---	0,1193	---	0,1099	---
Diferença entre as médias =	11,5833	---	7,5733	---	11,1628	---
IC 95% (Dif. entre médias) =	-124.5481 a 147.7148		-75.2615 a 90.4082		-115.9313 a 138.2569	
IC 99% (Dif. entre médias) =	-670.2203 a 693.3869	---	-407.2985 a 422.4451	---	-625.3782 a 647.7038	---

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Tabela suplementar 5 (TS5) - Teste-t das médias dos teores de N da MOP e MOAM entre os ambientes periglacial (sítio D-S1, T-S1 e B-S1) e proglacial (D-S8, T-S3 e B-S3)

Descrição	Periglacial MOP	Proglacial MOP	Periglacial MOAM	Proglacial MOAM	Periglacial Total	Proglacial Total
Tamanho =	3	3	3	3	3	3
Média =	0,0021	0	0,0011	0,0001	0,0162	0
Variância =	0	0	0	0	0,0006	0
Variância =	0	---	0	---	0,0002	---
t =	1,1004	---	1,5645	---	1,1053	---
Graus de liberdade =	2	---	2,05	---	2	---
p (unilateral) =	0,1929	---	0,1291	---	0,1921	---
p (bilateral) =	0,3859	---	0,2581	---	0,3842	---
Poder (0.05)	0,2929	---	0,4679	---	0,2946	---
Poder (0.01)	0,1068	---	0,2217	---	0,1078	---
Diferença entre as médias =	0,0021	---	0,001	---	0,0162	---
IC 95% (Dif. entre médias) =	-0.0225 a 0.0268		-0.0072 a 0.0092		-0.1698 a 0.2022	
IC 99% (Dif. entre médias) =	-0.1212 a 0.1255	---	-0.0402 a 0.0422	---	-0.9154 a 0.9477	---

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Tabela suplementar 6 (TS6) – Mapeamentos da área de pico dos compostos orgânicos dos solos (MOP e MOAM) e vegetações no recuo Demay Point (sítios: D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8) da ASPA 128, Antártica Marítima. Os vegetais e líquens foram abreviados em: CQ: *C. quitensis*; DA: *D. antarctica*; MG: musgo; MGM: musgo moribundo; PC: *P. crispata*; UA: *U. antarctica*; e UAA: *U. aurantiacoatra*

Caracterização orgânica	Vegetação							MOP								MOAM							
	CQ	DA	MG	MGM	PC	UA	UAA	D-S1	D-S2	D-S3	D-S4	D-S5	D-S6	D-S7	D-S8	D-S1	D-S2	D-S3	D-S4	D-S5	D-S6	D-S7	D-S8
Bioativo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91	0,36	1,16	0,93	1,03	0,73	0,00	0,00	0,85	1,18	0,81	0,77	0,84	0,00	1,90	0,55
Biopolímeros	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,32	0,00	0,00	0,00	0,53	0,00	0,00	2,43	1,22	0,37	0,00	0,00
Aminoácidos	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Carboidrato	6,06	13,38	0,00	0,00	0,00	4,39	2,35	2,08	0,00	0,00	2,91	1,96	0,00	2,02	0,00	3,58	0,00	0,50	5,41	4,59	1,40	0,00	0,00
Derivados de lignina	4,71	2,30	0,00	0,00	0,00	0,00	4,18	2,93	3,69	3,27	1,73	0,99	2,97	0,39	4,06	3,10	10,16	3,51	1,80	2,10	0,00	0,00	0,00
Lípido	2,20	1,97	5,96	1,53	0,00	5,07	4,93	18,60	23,74	18,84	8,23	8,56	24,37	6,03	29,65	5,24	11,34	12,21	5,95	6,13	33,04	77,68	15,81
Atividade microbiana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,98	0,00	2,30	0,57	0,36	0,00	2,94	6,42	1,42	6,44	1,27	2,21	1,40	0,35	0,00	0,00
Compostos nitrogenados	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	0,00	0,00	0,53	0,00	0,00	0,60	0,00	1,60	0,00	0,00	1,43	0,78	0,00	0,00	0,00
Terpeno	0,00	0,00	3,33	0,63	1,57	1,59	0,00	0,81	0,77	0,98	0,69	1,03	0,00	0,68	0,00	1,27	1,61	0,87	0,62	0,82	0,00	0,00	0,00
Vitamina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Álcool	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,61	7,38	3,27	2,89	0,00	2,97	0,41	4,06	26,72	11,58	3,81	4,80	2,96	0,00	0,00	0,00
Aldeído	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00
Amida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,60	0,00	6,24	1,95	0,36	0,00	3,54	6,42	40,13	12,87	3,59	11,27	4,90	0,00	1,90	0,00
Amina	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,09	0,00	0,37	1,59	1,77	0,00	2,19	0,00	41,36	1,53	0,00	1,29	1,38	0,00	0,00	0,00
Ácido carboxílico	0,00	0,00	5,96	1,78	0,00	0,00	0,00	9,13	2,83	4,49	1,81	1,90	0,00	0,00	2,20	3,49	11,39	3,41	4,07	2,12	0,00	0,00	0,00
Carbonila	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Enol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ester	2,32	1,92	0,00	1,43	0,00	5,07	4,93	379,60	138,20	88,61	72,14	66,34	71,23	41,79	57,10	226,50	89,86	126,20	141,26	54,57	66,33	77,68	63,50
Éter	4,79	7,04	0,00	1,58	0,00	4,39	2,96	10,43	0,00	0,28	11,00	3,96	0,00	4,14	36,16	0,00	1,00	10,35	9,21	4,19	0,00	0,00	0,00
Haletos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,97	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Éter/Ester	8,59	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00
Hidrocarboneto	0,00	0,00	3,33	0,63	1,57	1,59	0,00	58,73	10,81	12,70	14,79	5,66	7,16	6,84	0,00	35,79	30,16	16,34	14,85	0,00	0,00	0,00	0,00

Caracterização orgânica	-----Vegetação-----							-----MOP-----			-----MOAM-----			-----MOP-----			-----MOAM-----		
	CQ	DA	MG	MGM	PC	UA	UAA	T-S1	T-S2	T-S3	T-S1	T-S2	T-S3	B-S1	B-S2	B-S3	B-S1	B-S2	B-S3
Terpeno	0,00	0,00	3,33	0,63	1,57	1,59	0,00	2,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,94	0,00	1,52	0,00	1,10	0,00
Vitamina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Álcool	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,46	0,00	6,09	0,00	0,00	0,00
Aldeído	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,14	0,35	1,16	2,91	1,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amina	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,45	0,00	0,00	5,76	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	1,83
Ácido carboxílico	0,00	0,00	5,96	1,78	0,00	0,00	0,00	5,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Carbonila	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Enol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ester	2,32	1,92	0,00	1,43	0,00	5,07	4,93	77,55	0,30	0,00	53,03	66,89	0,00	52,39	5,43	68,51	59,05	71,57	1,87
Éter	4,79	7,04	0,00	1,58	0,00	4,39	2,96	1,98	0,35	0,27	0,57	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	2,36	0,00	0,00
Haletos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,04	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Éter/Ester	8,59	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hidrocarboneto	0,00	0,00	3,33	0,63	1,57	1,59	0,00	12,70	0,97	1,45	14,06	13,02	0,00	12,99	0,00	21,21	0,92	4,87	1,67
Cetona	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alifático	2,20	1,96	4,16	1,27	1,57	3,57	3,21	101,60	1,32	2,88	68,95	81,67	0,00	0,00	0,00	0,00	59,97	76,44	5,37
Aromático	6,45	9,02	0,00	0,90	0,00	0,00	4,18	6,20	0,30	0,00	3,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alifático cíclico	1,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,90	0,35	0,00	4,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,36	0,00	0,00
Função hidrogenada	0,00	0,00	3,32	0,63	1,28	1,59	0,00	12,70	0,97	1,45	14,06	13,02	0,00	13,44	0,00	21,21	0,92	4,87	1,67
Mix de funções	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,46	0,35	1,16	7,19	1,76	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	1,83
Função nitrogenada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15	0,00	0,00	1,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Função oxigenada	1,72	1,87	5,96	1,55	0,00	4,16	3,92	89,39	0,65	0,27	54,19	66,89	0,00	58,83	6,48	74,60	61,41	71,57	1,87

Fonte: elaborado pelo autor.

4 RETRAÇÃO DE GELEIRAS E SOLOS DRENADOS DIVERSIFICAM COMUNIDADES MICROBIANAS E AUMENTAM A ABUNDÂNCIA DE FUNGOS NA ANTÁRTICA MARÍTIMA

Resumo: As comunidades microbianas são as mais responsivas às alterações ambientais, desde aquelas existentes nos ambientes mais secos àqueles mais úmidos da Antártica. Porém, pouco se sabe sobre as mudanças ocorridas nas comunidades microbianas em solos das retrações de geleiras da Antártica Marítima. Objetivou-se avaliar as comunidades microbianas de solos dos recuos das geleiras da ilha King George, sob diferentes ambientes e coberturas vegetais, visando um maior entendimento das mudanças ocorridas. A coleta de amostras de solo e vegetação foi realizada em sítios, delimitados por processos geomorfológicos, altitude, distância da geleira e tipo de cobertura vegetal. O solo foi caracterizado química e fisicamente, fracionado em matéria orgânica particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) e determinados C (Walkley-Black), N (Kjedhal) e moléculas orgânicas (termoquimólise). A caracterização das comunidades microbianas do solo foi realizada pela extração e análise de ácidos graxos fosfolipídicos. Os resultados mostraram um aumento da abundância microbiana do solo conforme as geleiras retraem (maior exposição da superfície do solo). A maior abundância e diversidade de marcadores microbianos foram encontrados em sítios com solos poligonais e também naqueles com comunidades vegetais dominadas por plantas inferiores. Os fungos foram dominantes em sítios com comunidades vegetais (55%) e solos poligonais (66%), correlacionando positivamente (r -Pearson para fungos totais = 0,49 e o biomarcador 18:1w9 = 0,52) com o distanciamento da geleira. Na análise de componentes principais, os fungos foram agrupados, de maneira geral, com as variáveis cascalhos e altitude. Além disso, observou-se uma pequena contribuição dos carboidratos na MOP e MOAM associada às variáveis Mg^{2+} , N total, N da MOAM, terpenos e carboidratos. Conclui-se que os solos mais drenados e estabilizados (ambientes periglaciais, com comunidades vegetais ou solos poligonais) da Antártica Marítima levaram ao aumento de fungos associados a carboidratos de plantas, na superfície dos solos de sítios mais distantes das geleiras.

Palavras-chave: comunidades vegetais, criptógamas, solo poligonal, estabilidade do solo, aquecimento global

Abstract: Microbial communities are the most responsive to environmental changes, from those existing in the driest to the wettest environments in Antarctica. However, little is known about the changes occurring in microbial communities in soils from the retreat of maritime Antarctic glaciers. The objective was to evaluate the microbial communities in soils from the retreat of glaciers on King George Island, under different environments and vegetation cover, to gain a better understanding of the changes that occurred. Soil and vegetation samples were collected from sites delimited by geomorphological processes, altitude, distance from the glacier, and type of vegetation cover. The soil was chemically and physically characterized, fractionated into particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAM), and C (Walkley-Black), N (Kjeldahl), and organic molecules (thermochemolysis) were determined. The characterization of soil microbial communities was performed by the extraction and analysis of phospholipid fatty acids. The results showed an increase in soil microbial abundance as the glaciers retreated (greater soil surface exposure). The highest abundance and diversity of microbial markers were found in sites with polygonal soils and also in those with vegetation communities dominated by lower plants. Fungi were dominant in sites with vegetation communities (55%) and polygonal soils (66%), positively correlating (Pearson-r for total fungi = 0.49 and biomarker 18:1w9 = 0.52) with glacier distance. In the principal component analysis, fungi were generally grouped with the variables gravel and altitude. Additionally, a small contribution of carbohydrates in POM and MAOM was observed, associated with the variables Mg²⁺, total N, N in MAM, terpenes, and carbohydrates. It is concluded that the most drained and stabilized soils (periglacial environments, with vegetation communities or polygonal soils) in Maritime Antarctica led to an increase in fungi associated with plant carbohydrates on the surface of soils in sites further away from the glaciers.

Key words: Plant communities, cryptogams, polygonal soil, soil stability, global warming.

4.1 Introdução

A Península Antártica é uma das regiões do hemisfério sul que recebe os maiores impactos do aquecimento atmosférico global, entre outros o derretimento de geleiras (TRUSEL *et al.*, 2015). Nessa região, modelos climáticos apontam para aumentos de temperatura (FERON *et al.*, 2021; JAKOBS *et al.*, 2021; TEWARI *et al.*, 2022), tendo sido registradas temperaturas de até 18,3°C em 2020 (FRANCELINO *et al.*, 2020). Esses picos de temperaturas positivas podem ser cada vez mais frequentes nos verões antárticos (FERON *et al.*, 2021). Tal condição pode resultar em uma maior retração de geleiras e, conseqüentemente, alterações do ciclo hidrológico na Antártica.

Com a retração das geleiras, a ocupação vegetal é intensificada em função do aumento da umidade na camada ativa do solo via degelo e do permafrost. A disponibilidade de água no solo governa a distribuição e produtividade das espécies vegetais na Antártica (ROBINSON *et al.*, 2018). No entanto, o aquecimento climático acelera as retrações de geleiras e do permafrost e, conseqüentemente, a conversão de água sólida em líquida, sendo drenada mais rapidamente nos solos esqueléticos ou pouco desenvolvidos da Antártica (DO VALE LOPES *et al.*, 2022), principalmente naqueles de maior altitude (FERRARI *et al.*, 2021; WILSON *et al.*, 2019). Tal condição torna a umidade do solo maior próximo da manta de gelo, permafrost e margens de lagos (STRAUSS; RUHL; DAY, 2009). Dessa maneira, a drenagem dos solos pode impactar a composição e características florísticas das comunidades vegetais (FERRARI *et al.*, 2021).

Nas Ilhas Shetland do Sul, assim como na Península Antártica, as retrações das geleiras permitem, de maneira geral, a formação de grupos de solos bem e mal drenados (EVERETT, 1976). A maior drenagem de alguns solos beneficia as espécies *Deschampsia antarctica* E. Desv., Fl. Chil. [Gay] 6: 338 (1854) e *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl., Reliq. Haenk. 2: 13 (1831), plantas vasculares com sistemas radiculares mais desenvolvidos, além de líquens (HILL *et al.*, 2019; EVERETT, 1976). A maior ocupação de plantas vasculares favorece o aumento da respiração do solo via raiz e rizosfera (HILL *et al.*, 2019). Assim, essas áreas vegetadas da Antártica são consideradas oásis para a comunidade microbiana, como maior abundância e diversidade bacteriana (KRAUZE *et al.* 2021).

As comunidades microbianas são as mais responsivas às alterações ambientais, desde os vales secos às zonas mais úmidas da Antártica (KIM *et al.*, 2018; TIAO *et al.*, 2012; YERGEAU *et al.*, 2012; ZEGLIN *et al.*, 2011). Respostas de comunidades microbianas a aumentos de temperatura, umidade do solo e matéria orgânica frescas na Antártica Marítima

revelaram a substituição de bactérias Gram-positivas por Gram-negativas (HORROCKS *et al.*, 2020). Porém, não se sabe sobre as mudanças da comunidade microbiana para solos que se tornam mais drenados.

Neste contexto, a ilha King George é uma das maiores do arquipélago das Ilhas Shetland do Sul. Localizada ao norte da Península Antártica, pode apresentar fenômenos que refletiram mudanças climáticas da Península Antártica e Antártica Marítima. Com isso, objetivou-se avaliar as comunidades microbianas do solo em recuos de geleiras da ilha King George sob diferentes ambientes e cobertura vegetal visando um maior entendimento das mudanças ocorridas em solos mais drenados.

4.2 Material e métodos

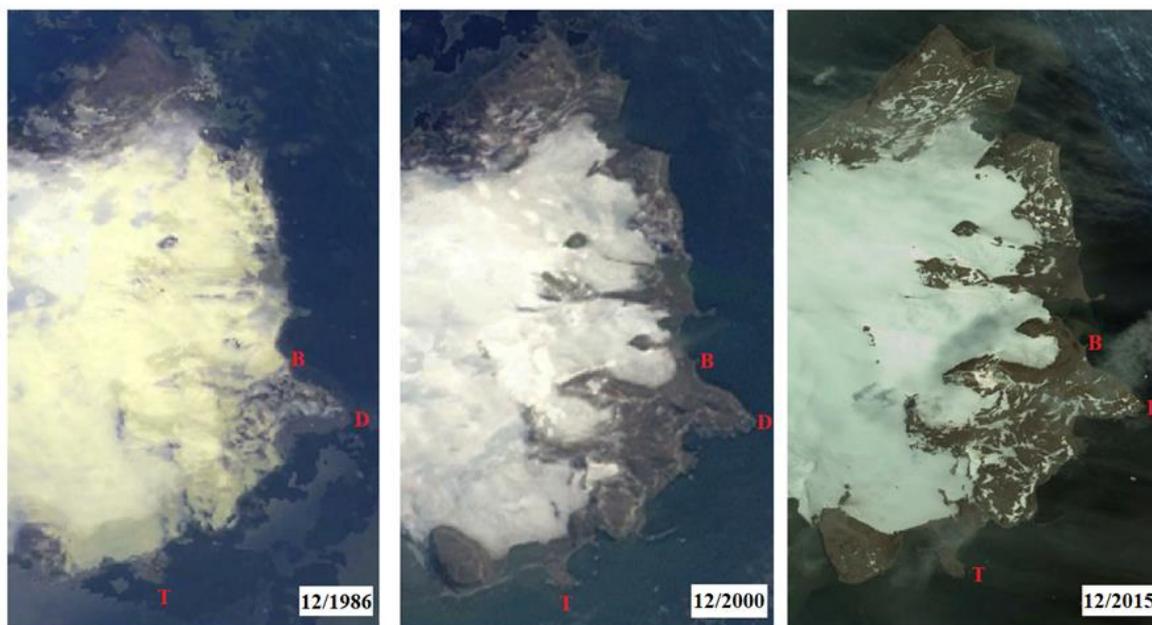
4.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Área Especialmente Protegida da Antártica (ASPA 128) da ilha de King George, na Antártica Marítima, criada para proteção de fauna (colônias de reprodução e locais de descanso para pinguins, pássaros voadores e mamíferos pinípedes) e flora (comunidades de musgos, líquens e gramíneas) (Instytut Biochemii i Biofizyki PAN, 2023). Os dados meteorológicos de médias anuais registrado para a ASPA 128 no período de 2013-2017 foram: temperatura do ar de $-1,7^{\circ}\text{C}$; umidade relativa do ar de 78,1%; radiação solar de $2934,6 \text{ Mj m}^{-2}$; e precipitação de 499,8 mm (PLENZLER *et al.* 2019). Os dados meteorológicos variam ao longo do ano a depender do período sazonal, onde as médias para o período de estudo (verão - mês de fevereiro) foram de: temperatura do ar de $1,6^{\circ}\text{C}$; umidade relativa do ar de 79,7 %; radiação solar de $336,3 \text{ Mj m}^{-2}$; e precipitação de 31,8 mm (PLENZLER *et al.* 2019). As coletas de dados foram conduzidas em sítios dos recuos das geleiras de Baranowski ($62^{\circ} 12,358'\text{S} - 58^{\circ} 26,422'\text{O}$), Demay Point ($62^{\circ} 12,690'\text{S} - 58^{\circ} 25,992'\text{O}$) e Telephone Point ($62^{\circ} 14,008'\text{S} - 58^{\circ} 28,329'\text{O}$) (Figura 2).

As retrações das geleiras na ASPA 128 ocorreram antes de 1940 e intensificaram após 1950 (ANGIEL; DAŃSKI, 2012). As retrações e tempos dos recuos são Baranowski (274 m e 44 anos [1979-2023]), Telephone Point (900 m e ano não estimado) e Demay Point estimados (1800 m e 67 anos). Telephone Point e Demay Point são anteriores a 1979 (PUDEŁKO *et al.*, 2018; SZIŁO; BIALIK, 2018). Acredita-se que, devido à sua altitude, o recuo Demay Point seja o recuo com maior tempo de exposição do solo, no caso, 67 anos (1956-2023) (PASIK *et*

al., 2021), deglaciando ao mesmo tempo que o recuo *Stenhouse Bluff* na mesma ilha King George (NOBLE, 1965). Demay Point passa por deglaciação mais rápida que os demais recuos analisados, tornando seus sítios mais distantes e menos influenciados pela geleira (Figura 21).

Figura 21 – Imagens das retrações das geleiras Demay Point (D), Baranowski (B) e Telephone Point (T) no mês de dezembro do ano de 1986 à 2015. Imagens obtidas do Landsat/Copernicus no Google Earth Pro



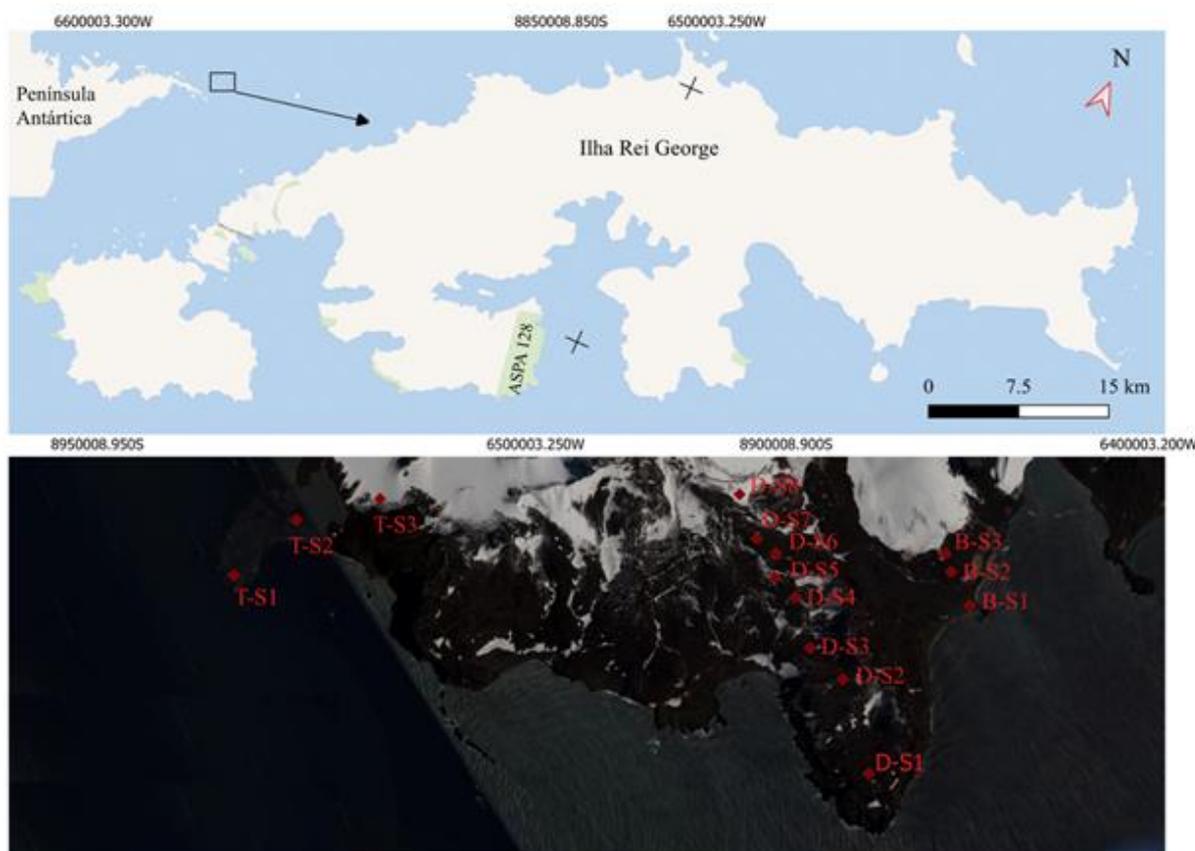
Fonte: elaborado pelo autor com imagens obtidas do Landsat/Copernicus no Google Earth Pro.

4.2.2 Amostragem de solo e vegetação

A coleta de amostras de solo e vegetação foi realizada em sítios, delimitados por processos geomorfológicos (relevo), altitude, distância da geleira e cobertura vegetal. Os sítios estão dispostos em distâncias diferentes em relação à geleira, formando transectos (um para cada recuo de geleira) (Figura 22). No transecto de Demay Point foram delimitados 8 sítios, 3 em Baranowski e 3 em Telephone Point. Cada sítio recebeu abreviação para identificação. A abreviação consta da primeira letra do nome do recuo, mais o S de sítio e o número da sua respectiva posição no recuo (ex.: sítio 1 de Demay Point = D-S1). A ordem numérica dos sítios foi crescente, do sítio mais distante (ex.: D-S1) da geleira para o mais próximo (ex.: D-S8).

Figura 22 – Área de estudo na ASPA nº128 da ilha King George, Antártica Marítima e localização dos sítios amostrados em cronosequência nos recuos Demay Point (D-S1, D-S2,

D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8), Telephone Point (T-S1, T-S2 e T-S3) e Baranowski (B-S1, B-S2 e B-S3)



Fonte: elaborado pelo autor com imagens obtidas do Landsat/Copernicus no Google Earth Pro e no QGIS.

Nos sítios foram coletadas amostras de solos deformadas na profundidade de 0,00 – 0,10 m, considerando parcelas de 0,10 por 0,15 m (0,015 m²). Para a análise de PLFA, as amostras de solo foram armazenadas a -20 °C, transportadas para o laboratório, liofilizadas e passadas por uma peneira de malha de 2 mm. Os exemplares vegetais coletados nas retrações das geleiras foram aqueles mais abundantes nos sítios e presentes nos sítios: *Deschampsia antarctica* É. Desv. 1854; *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. 1831; *Prasiola crispa* ssp. *antarctica* (Kütz.) Knebel; líquens (*Usnea antarctica* ssp e *Usnea aurantiacoatra* (Jacq.) Bory, 1826) e musgos (*Sanionia uncinata* (Hedw) Loeske 1907 e musgo moribundo). As distâncias dos sítios para a geleira foram determinadas no Google Earth Pro, numa imagem de 2016. A altitude dos sítios foi obtida em pesquisas realizadas na ASPA 128 por Dąbski *et al.* (2017) e Pudelko *et al.* (2018). Os processos geomorfológicos para Baranowski, Demay Point e Telephone Point foram feitos com o auxílio das descrições já publicadas (DĄBSKI *et al.*, 2017, 2020). Na abertura dos perfis de solos constatou-se a ausência de permafrost à 1 m ou mais,

assim como verificado por Dabski et al. (2017) em Baranowski. A descrição dos sítios com mais detalhes está na tabela 14 e as imagens na figura 23.

Tabela 14 – Altitude e descrição sumária dos sítios de amostragem de solo em transectos a diferentes distâncias das geleiras dos recuos de Demay Point, Baranowski e Telephone Point localizados na ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima

Recuo	Sítio	Altitude (m)	Distância da Geleira (m)	Descrição
Demay Point	D-S1	~62-79	~1.951	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Leptosol</i> • Solo com comunidade vegetal (plantas superiores e inferiores) composta de <i>D. antarctica</i>; <i>C. quitensis</i>; musgos moribundos; líquens (<i>U. antarctica</i> e <i>U. aurantiacoatra</i>), presença de Skuas e escarpa para o mar.
	D-S2	~70	~1.343	<ul style="list-style-type: none"> • Solo poligonal com criptógamas (ocorrência de musgos moribundos), líquens no entorno, presença de Skuas e ninhos delas.
	D-S3	~60-70	~1.090	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Turbic Cryosol</i> • Solo estriado (Solifluction landfrons) com musgos (<i>S. uncinata</i> pouco desenvolvida) ocasionais nas estrias.
	D-S4	~80-90	~790	<ul style="list-style-type: none"> • Solo com comunidades vegetais (plantas inferiores) de criptógamas (musgos e líquens), além da presença de Skuas e afloramento rochoso.
	D-S5	~90-100	~483	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Leptosol</i> • Solo com tapetes de <i>S. uncinata</i> às margens de lago periglacial, afloramento rochoso e fluxos de lama.
	D-S6	~100-110	~259	<ul style="list-style-type: none"> • Solo sem vegetação com afloramento rochoso e deslizamento de terra em direção a Baranowski.
	D-S7	~70-80	~120	<ul style="list-style-type: none"> • Depressão com comunidade de musgo e ocorrência de <i>D. antarctica</i> com canal de dreno para riacho em Baranowski.
	D-S8	~140	~3	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Cryosol</i> • Paisagem proglacial – Moraina, com deslizamento de terra para o ponto de amostragem D-S7.
Baranowski	B-S1	~10	~848	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Cambisol</i> • Terraço marinho com <i>D. antarctica</i> e <i>P. crispa</i> ssp. com afloramento rochoso (seixos rolados) entre mar e lago.
	B-S2	~20	~406	<ul style="list-style-type: none"> • Solo com afloramento rochoso com ocorrência de <i>D. antarctica</i> entre geleira e lago.
	B-S3	~30	~3	<ul style="list-style-type: none"> • Paisagem proglacial – Moraina/ afloramentos rochosos, deslizamentos de terra e fluxos de lama
Telephone Point	T-S1	~10-20	~902	<ul style="list-style-type: none"> • Terraço marinho com ocupação de <i>D. antarctica</i> (em cima de camada de turfa e

Recuo	Sítio	Altitude (m)	Distância da Geleira (m)	Descrição
				próximo da pinguineira), <i>C. quitensis</i> , <i>P. crispera</i> e musgo em solo sem turfa com afloramento rochoso
	T-S2	~6	~434	• Terraço marinho com afloramento rochoso (seixos rolados) com ocorrência de <i>D. antarctica</i> de frente para o lago.
	T-S3	~7	~3	• Paisagem proglacial – Moraina/ com afloramento rochoso e deslizamento

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 23 – Imagens dos sítios nos recuos Demay Point, Baranowski e Telephone Point



Fonte: elaborado pelo autor. Imagens de * Alison Havnes e ** Caik Miranda.

4.2.3 Análise de ácidos graxos fosfolipídicos (PLFA)

A caracterização das comunidades microbianas do solo foi realizada pela extração e análise de ácidos graxos fosfolipídicos (PLFA) (BLIGH; DYER, 1959; BALSER *et al.*, 2002; FERNANDES; CHAER, 2010). Três gramas (3 g) de solo foram adicionados a um tubo de centrífuga com 0,5 mL de água destilada, 1,5 mL de tampão fosfato, 4 mL de clorofórmio, 8 mL de metanol e colocados em agitação por 16 h a 140 rpm. Em seguida, as amostras foram centrifugadas por 12 min (3x) a 2000 rpm e filtradas em filtro Whatman. NaCl foi adicionado para a fase de separação, seguido pela extração de clorofórmio e secagem a 38°C sob fluxo de N₂.

Na etapa seguinte, clorofórmio e acetona foram adicionados e filtrados através de uma coluna de sílica, tendo sido adicionados metanol, descartando-se o que passou pelo filtro. O último filtrado foi recolhido e seco a 38°C sob fluxo de N₂. As amostras foram suspensas com 1 mL de metanol: tolueno (proporção 1:1), 1 mL de hidróxido de potássio, e também adicionado o padrão interno (Metil Nonadecanoato), sendo posteriormente levadas ao banho-maria por 15 min. Após esse procedimento, as amostras foram agitadas, separando as fases e extraídas, adicionados 2 mL de água deionizada, 0,3 mL de ácido acético, 0,5 mL de hexano e agitados. Finalmente, o hexano foi extraído e seco a 38°C sob fluxo de N₂, seguido pela adição de hexano e colocado em insertos para análise cromatográfica.

A identificação das moléculas e estruturas dos compostos químicos da matéria orgânica do solo foi realizada por meio de buscas às bibliotecas do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) e do Centro Nacional de Informações sobre Biotecnologia (NIH) na Biblioteca Nacional de Medicina. As moléculas dos ácidos graxos foram abreviadas, agrupados em: (i) biomarcadores específicos {Actinomycetes (Actinobactérias: 10Me-17:0 e 10Me-18:0)}; grupos inespecíficos (14:0, 15:0, 16:0, 18:0, 18:2n6 e 18:3w9,12,15); *Bacillus thurginiensis* (Bacillaceae: 17:1w10); estresse bacteriano (18:1w11); fungos micorrízicos arbusculares – FMA (18:1w9); bactérias redutoras de sulfato (SRB: a16:0); bactérias metanogênicas (Arqueobactérias: a16:1w8). (ii) Posteriormente em grupos funcionais: bactérias gram-positivas (10Me-17:0, 10Me-18:0, 17:1w10, 18:1w11, i14:0, i15:0, a16:0, i16:0, i17:0 e i18:0); gram-negativas (16:1w9, 19:1w9, a16:1w8 e cy19:0); bactérias totais (10Me-17:0, 10Me-18:0, 15:1w8, 17:1w10, 18:1w11, i14:0, i15:0, a16:0, i16:0, i17:0 e i18:0); fungos totais (18:2w9,12 e 18:1w9) e grupos inespecíficos (14:0, 15:0, 16:0, 18:0). As referências dos biomarcadores, grupos específicos e grupos funcionais estão disponíveis na tabela suplementar (TS13). Para a análise dos dados foram considerados apenas biomarcadores de cadeias carbônicas curtas, nas faixas de 14C à 19C, as mais usadas recentemente na identificação de grupos microbianos (MASSACCESI *et al.*, 2019; PROESMANS *et al.*, 2022; WU; YU, 2019). As cadeias carbônicas longas ou que não foram possíveis abreviar receberam o status de ‘outros’. Os resultados da caracterização dos ácidos graxos fosfolipídios, com o tempo de retenção, estão disponíveis na tabela suplementar TS14.

4.2.4 Análise de dados

As análises gráficas da abundância de ácidos graxos fosfolipídios (PLFA), biomarcadores específicos e grupos funcionais foram elaborados no programa BioEstat 5.0. O índice de diversidade de Shannon (H) foi determinado no programa Past 4.03 para verificar quais sítios aumentam a diversidade de biomarcadores com a retração das geleiras. No programa R (versão 4.2.2) foram executadas as análises de: distribuição multidimensional não métrica (NMDS); componentes principais (PCA) e correlação de Pearson. A análise NMDS foi usada para o ordenamento de biomarcadores e verificação das similaridades dos sítios para a composição da comunidade microbiana, por meio do *pacman*. Para a PCA, foram utilizados os seguintes pacotes: *factoextra*, *factoMiner* e *tidyverse*, verificando a dispersão e agrupamento de sítios, comunidades microbianas com os compostos bioquímicos e propriedades físicas e químicas do solo do tópico 3. A correlação de Pearson foi executada com pacote *corr* para verificar o relacionamento entre grupos microbianos e a distância das geleiras. Para isso os dados numéricos foram submetidos ao log na base 10 para reduzir as discrepâncias dos valores.

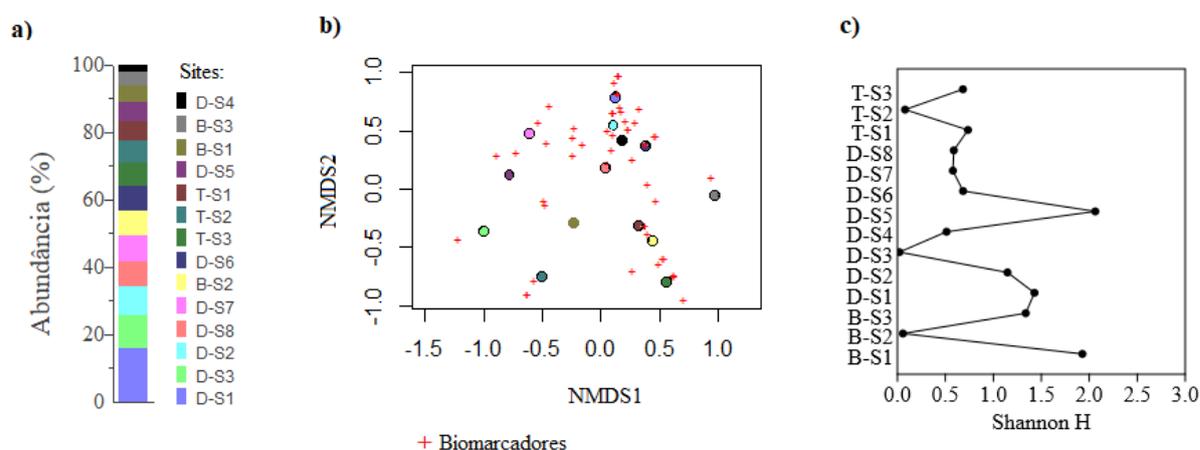
4.3 Resultados

Os sítios com solo poligonal (D-S2) e comunidade vegetal dominada por plantas criptoendolíticas (D-S1) apresentaram a maior abundância, porém com diversidade intermediária (índice H entre 0,5 e 2,0) de biomarcadores microbianos (Figura 24a). Comparando os recuos, a maior abundância de ácidos graxos fosfolipídios (PLFA) ocorreu nos sítios de Demay Point, com média geral de 8,07% (Figura 4a). Neste recuo, os sítios com maior abundância de PLFAs foram aqueles com comunidade vegetal dominada por plantas criptoendolíticas (D-S1 = 15,72%), solo estriado (D-S3 = 10,09%) e solo poligonal (D-S2 = 8,3%). A abundância de PLFAs em Telephone Point foi intermediária aos sítios dos recuos de Demay Point e Baranowski, com média de 6,36%. Em Baranowski, a abundância média dos três sítios foi de 5,44%, com a maior porcentagem, 7,43%, no solo bem drenado (B-S2). De maneira geral, a menor abundância de PLFAs foi observada nos solos com comunidades vegetais ausentes de plantas superiores (D-S4 = 2,28%), tapetes de musgos em solos hidromórficos (D-S5 = 5,63 %), solos de moraina encharcada (B-S3 = 4 %) e sítios com ocupação recente de *D. antarctica* (B-S1 = 4,9%).

A escala multidimensional não métrica (NMDS), aplicada aos biomarcadores, mostrou que no recuo Demay Point (sítios D-S1, D-S2, D-S4, D-S5, D-S7 e D-S8) há o maior agrupamento de biomarcadores (Figura 24b). Os sítios com comunidade de plantas superiores e inferiores (D-S1), solo poligonal (D-S2) e comunidade de plantas criptoendolíticas (D-S4) foram agrupados com mais biomarcadores. Para todos os recuos, os solos úmidos (solo estriado-D-S3, com ocupação de *D. antarctica* e *P. crispa*: B-S1; moraina hidromórfica: B-S3 e solo nu: T-S2) foram os que menos agruparam biomarcadores microbianos.

Os recuos apresentaram índices de diversidade de Shannon (H) variáveis para os biomarcadores microbianos, dependendo da drenagem e cobertura vegetal (Figura 24c). A maior diversidade de biomarcadores ($H \sim 2,0$) foi verificada nos solos hidromórficos com tapete de musgos (D-S5) e muito úmido com *D. antarctica* e *P. crispa* (B-S1). Sítios bem drenados próximos das geleiras (D-S6, D-S7, D-S8 e T-S3), exceto o de Baranowski, apresentaram índices H similares, em torno de 0,7. Solos nus de recuos menores (T-S2 e B-S2) e estriados (D-S3) não apresentaram diversidade de biomarcadores microbianos. Já a moraina hidromórfica (B-S3), solo poligonal (D-S2) e com comunidade vegetal (D-S1) apresentaram índice H entre 1,0 e 1,5.

Figura 24 – (a) Abundância de ácidos graxos fosfolipídios, (b) Distribuição multidimensional não métrica (NMDS) de biomarcadores e (c) Índice de diversidade de Shannon para biomarcadores nos recuos Demay Point (D - S1, D - S2, D - S3, D - S4, D - S5, D - S6, D - S7 e D - S8), Telephone Point (T - S1, T - S2 e T - S3) e Baranowski (B - S1, B - S2 e B - S3).



Fonte: elaborado pelo autor.

Nos recuos foram encontrados biomarcadores que representaram grupos específicos de actinobactérias, *Bacillus thuringiensis*, bactérias, bactérias metanogênicas, bactérias redutoras

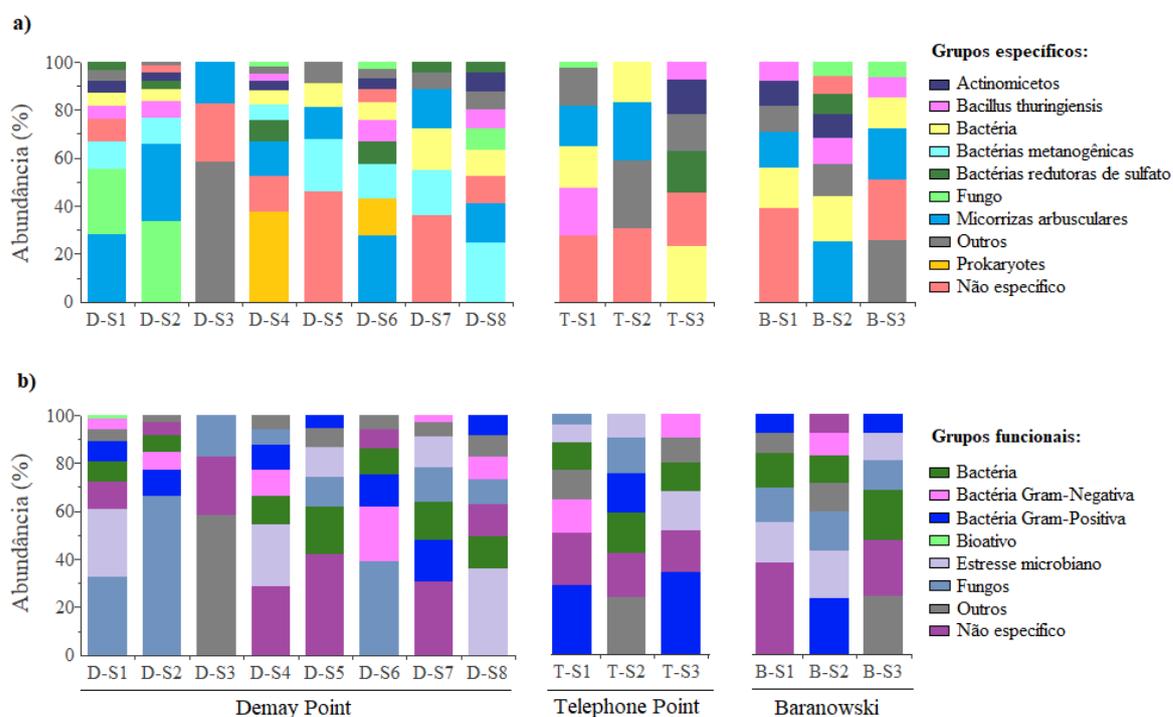
de sulfato, marcadores não específicos de bactérias, fungos, procariontes e cadeias longas de lipídios (outros) (Figura 25a). Na abundância geral, os grupos bacterianos foram mais abundantes que os fúngicos. No entanto, bactérias e fungos apresentaram abundâncias semelhantes, aproximadamente 30% para ambos, nos sítios mais distantes da geleira (D-S1 e D-S2). Grupos procariontes e outros foram menos abundantes.

As bactérias foram abundantes, entre 40 e 62%, nos sítios mais drenados e próximos às geleiras (D-S6 = 45%, D-S7 = 41%, D-S8 = 56%, T-S3 = 62% e B-S2 = 48%) (Figura 25a). As bactérias metanogênicas foram as mais abundantes, mas ocorreram somente no recuo Demay Point, com maior abundância em solo hidromórfico com tapete de musgos (D-S5 = 21,72 %) e moraina drenada (D-S8 = 24,80 %). *Bacillus thuringiensis* foi abundante em solos ornitogênicos com tapetes de *D. antarctica* (T-S1 = 19,65 %). Bactérias redutoras de sulfato e actinobactérias tiveram maior abundância na moraina (17,27 % e 14,25 %, respectivamente) de Telephone Point (T-S3).

Os fungos estavam presentes em todos os recuos e sítios, exceto no sítio T-S3 de Telephone Point (Figura 25a). A maior abundância fúngica (fungos totais = fungos específicos + FMA) foi observada em sítios bem drenados (D-S1 = 56%, D-S2 = 66%, D-S6 = 30% e B-S2 = 31%), com exceção para a moraina hidromórfica de Baranowski (B-S3 = 27,41 %). Os FMAs foram abundantes em todos os recuos, ultrapassando os fungos não específicos e estão mais associados aos sítios mais drenados com comunidades vegetais (D-S1 = 28%), solo poligonal (D-S2 = 33%), solo nu (D-S6 = 25%) e com ocorrência da espécie *D. antarctica* (T-S2 = 24% e B-S2 = 25%).

Os grupos funcionais bactérias Gram-positivas (G+) e Gram-negativas (G-) e fungos foram mais abundantes em solos bem drenados (Figura 25b). Em termos de grupos funcionais, bactérias G+ foram mais abundantes que bactérias G- (Figura 25b). As bactérias G+ possuíram maior abundância em condições de solos mais úmidos (D-S7 = 17,07%, B-S1 = 28,63% e B-S3 = 34,22%), com exceção do solo poligonal drenado (D-S2 = 22,35 %). As bactérias G- foram mais abundantes que G+ somente no sítio de solo nu (D-S6 = 22,50 % e 13,67 %, respectivamente), porém inferiores a fungos (39,23%). Os fungos foram abundantes em solos de maior altitude e mais drenados, com domínio no solo poligonal (D-S1 = 32,54%, D-S2 = 66,14% e D-S6 = 39,23%). Em solos de baixa altitude, os fungos foram abundantes apenas no recuo Baranowski, principalmente no solo mais drenado (B-S2 = 16,2 %).

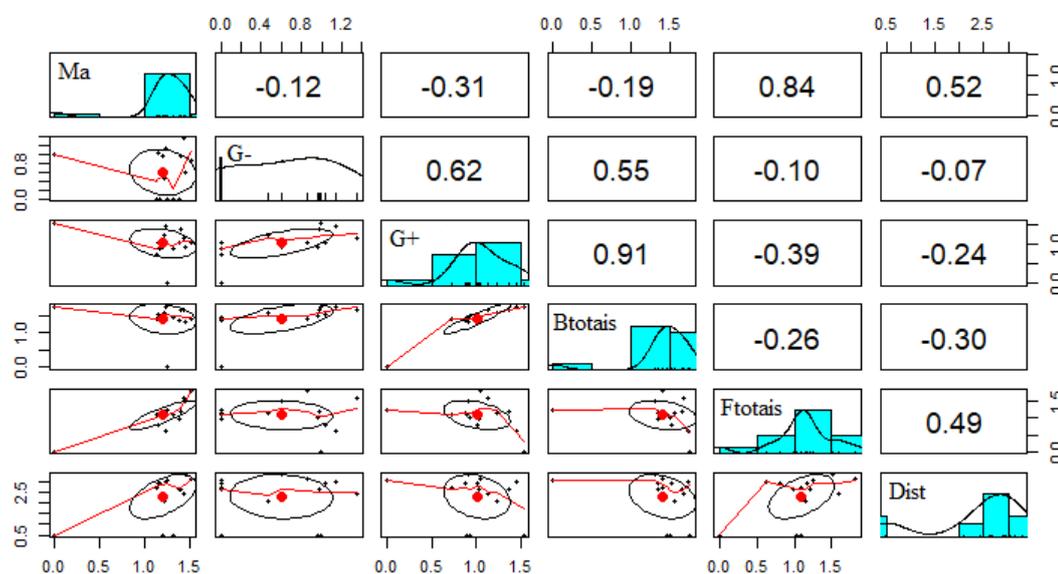
Figura 25 – (a) Abundâncias de grupos específicos e (b) de grupos funcionais de biomarcadores nos sítios dos recuos Demay Point (D - S1, D - S2, D - S3, D - S4, D - S5, D - S6, D - S7 e D - S8), Telephone Point (T - S1, T - S2 e T - S3) e Baranowski (B - S1, B - S2 e B - S3).



Fonte: elaborado pelo autor.

Para o efeito da retração das geleiras, a correlação de Pearson revelou que os grupos bacterianos totais tendem a reduzir com a retração das geleiras ($r = -0,30$) (Figura 26). Por outro lado, os fungos totais aumentaram com a retração das geleiras ($r = 0,49$). A maior redução foi verificada para bactérias G+ ($-0,24$). Bactérias G+ foram as mais abundantes e apresentaram elevado coeficiente de correlação ($r = 0,91$) com as comunidades bacterianas (bactérias totais). Bactérias G- foram menos abundantes, correlacionado mais fracamente com a comunidade bacteriana ($r = 0,55$). Os FMAs tiveram correlação positiva com a retração das geleiras ($r = 0,52$).

Figura 26 – Correlação de Pearson entre fungos Ma: micorrízicos arbusculares, Ftotais: fungos totais, G-: bactérias Gram-negativas, G+: bactérias Gram-positivas, Btotais: bactérias totais e Dist: distância das geleiras da ASPA 128, Península Antártica

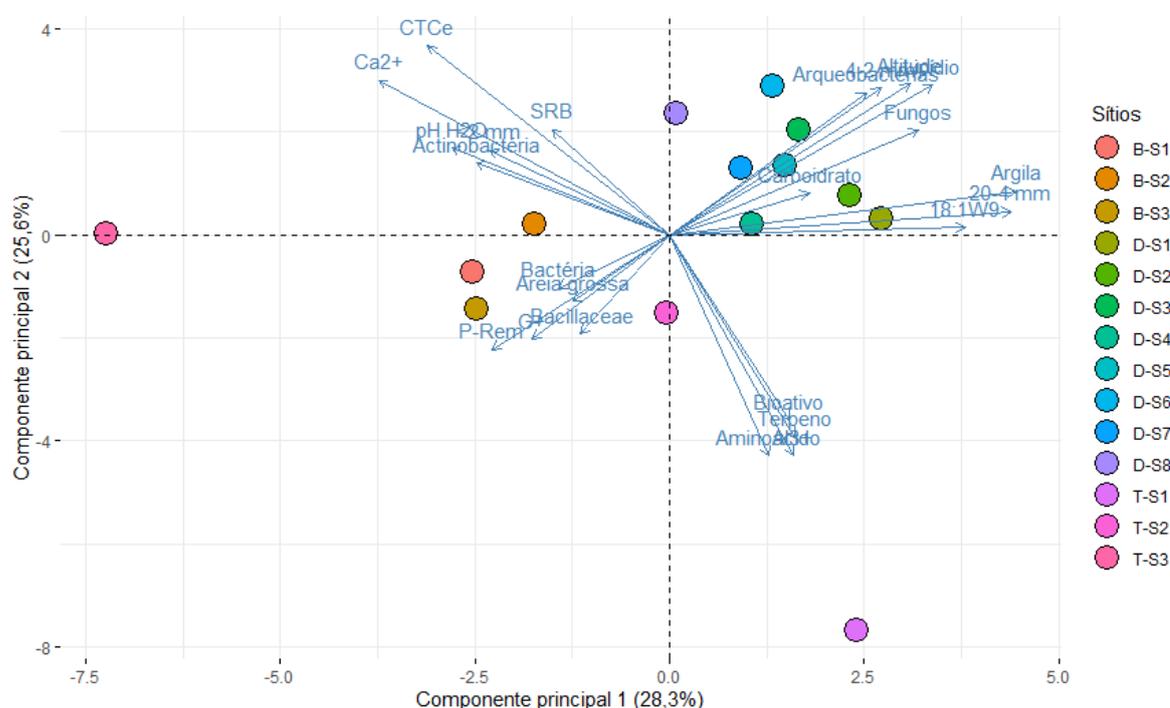


Fonte: elaborado pelo autor.

Na análise de componentes principais (PCA), os componentes 1 e 2 explicaram 53,9% dos agrupamentos para a relação entre atributos físicos e químicos do solo, compostos moleculares da matéria orgânica particulada (MOP) e da comunidade microbiana. Especificamente, o componente 1 (PCA 1) explicou 28,3%, enquanto o componente 2 (PCA 2) explicou 25,6% (Figura 27). Os sítios de Demay Point e o solo ornitogênico com D. antarctica (T-S1) de Telephone Point estão agrupados na PCA 1, enquanto os demais sítios dos recuos menores estão agrupados na PCA 2. Essa divisão nítida indica uma distinção entre sítios de maior retração (Demay Point) e sítios menores (Telephone Point e Baranowski). Os sítios dos recuos menores mostraram associação com P remanescente, areia grossa, bactérias totais, Bacillaceae e bactérias G+. Bactérias redutoras de sulfato e Actinobactérias foram agrupadas com propriedades químicas do solo (Ca²⁺, CTCe e pH) e terra fina (<2 mm), sem estar associadas a um sítio específico. Dos recuos menores, apenas o sítio T-S1, com solo ornitogênico, apresentou agrupamento com a MOP, mais especificamente com terpenos, bioativos e aminoácidos. Os sítios do recuo Demay Point foram agrupados com arqueobactérias, fungos totais e FMA (micorrizas arbusculares). As FMAs, frações de cascalhos de diâmetro entre 4-20 mm e argila foram associados aos sítios com comunidade vegetal. Fungos totais e arqueobactérias foram agrupados com lipídios, altitude e cascalhos pequenos (2-4 mm), principalmente no solo hidromórfico com tapetes de musgos. Os sítios

vegetados foram associados com carboidratos, e estes, por sua vez, foram associados a fungos. Esses resultados fornecem insights valiosos sobre a relação entre os atributos do solo, a matéria orgânica particulada e a comunidade microbiana, bem como a distribuição desses componentes em diferentes sítios e recuos na região estudada.

Figura 27 – Análise de componentes principais entre grupos microbianos, propriedades físicas e químicas e de compostos moleculares da MOP dos recuos Demay Point (D - S1, D - S2, D - S3, D - S4, D - S5, D - S6, D - S7 e D - S8), Telephone Point (T - S1, T - S2 e T - S3) e Baranowski (B - S1, B - S2 e B - S3)

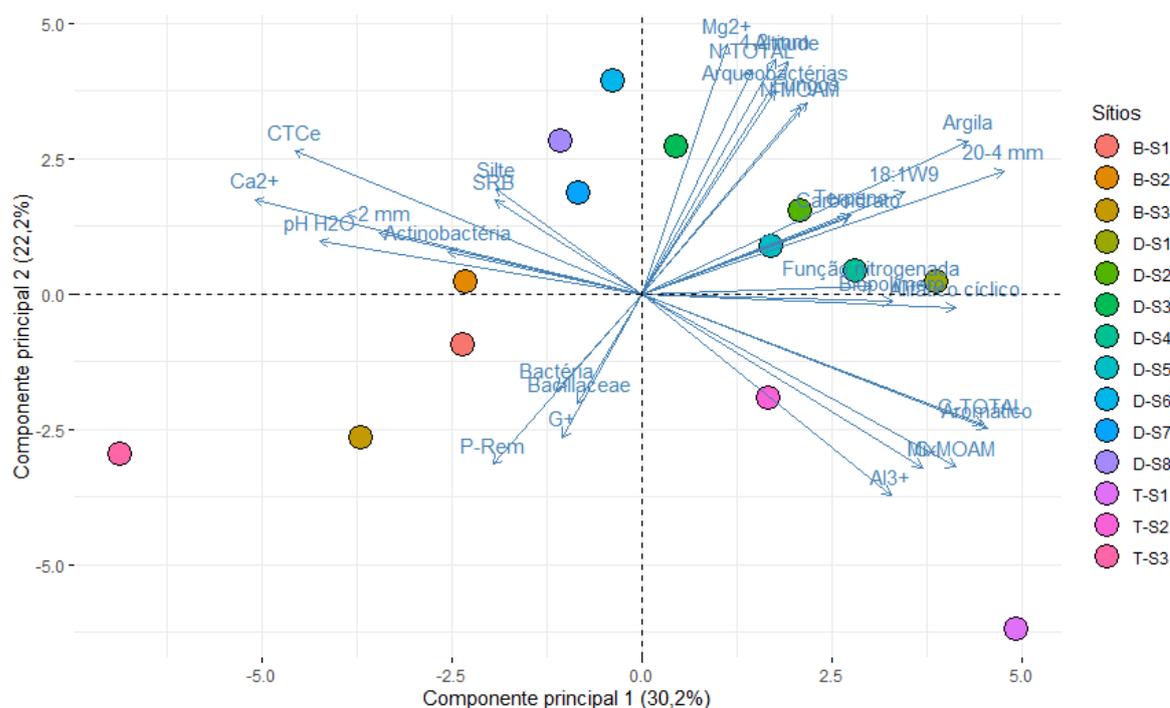


Fonte: elaborado pelo autor.

Na matéria orgânica associada a minerais (MOAM), os componentes 1 e 2 explicaram 52,4% dos agrupamentos da análise de componentes principais (PCA) para a relação entre atributos físicos, químicos e microbianos. Mais especificamente, o componente 1 (PCA 1) explicou 30,2%, enquanto o componente 2 (PCA 2) explicou 22,2% (Figura 28). As bactérias redutoras de sulfato e as actinobactérias foram agrupadas com as propriedades químicas do solo, assim como ocorreu com a MOP. No entanto, na MOAM, essas bactérias apresentaram uma associação mais forte com silte e terra fina (<math><2\text{ mm}</math>), indicando uma maior afinidade com solos úmidos, porém drenados (B-S2, D-S6, D-S7 e D-S8). As bactérias totais, Bacillaceae e bactérias G⁺ permaneceram associadas a P remanescente, mas apresentaram menor associação

com os sítios em comparação com outros fatores. Os sítios T-S1 e T-S2 de Telephone Point não demonstraram associação com as comunidades microbianas, mas estiveram relacionados com C-total, C-MOAM, compostos aromáticos, compostos nitrogenados e Al^{3+} . Por outro lado, os sítios mais distantes da geleira de Demay Point (D-S1, D-S2, D-S3, D-S4 e D-S5) foram agrupados com fungos, arqueobactérias, N-total, N-MOAM, Mg^{2+} , cascalhos, Al^{3+} , FMAs, terpenos, carboidratos, funções nitrogenadas, biopolímeros e alifáticos cíclicos. Esses resultados destacam as relações complexas entre os componentes físicos, químicos e microbianos nos solos associados a minerais e fornecem informações relevantes para entender as interações e influências desses fatores na região estudada. O conhecimento desses padrões pode contribuir para a compreensão dos ciclos biogeoquímicos e da ecologia desses ecossistemas.

Figura 28 – Dispersão gráfica em componentes principais de grupos microbianos, propriedades físicas e químicas do solo e de compostos moleculares da matéria orgânica particulada (MOAM) dos recuos Demay Point (D - S1, D - S2, D - S3, D - S4, D - S5, D - S6, D - S7 e D - S8), Telephone Point (T - S1, T - S2 e T - S3) e Baranowski (B - S1, B - S2 e B - S3).



Fonte: elaborado pelo autor.

4.4 Discussão

Os resultados mostraram aumento da abundância microbiana do solo conforme as geleiras se retraem. O maior tempo de exposição dos solos (recoo Demay Point) proporcionou o aumento da abundância e diversidade de biomarcadores microbianos, em conformidade com aumento da ocupação e diversidade biológica em áreas de retração de geleiras da Península Antártica (BERGSTROM; CONVEY; HUISKES, 2006; BROOKS *et al.*, 2019). Quanto mais a geleira retrai, mais estável o solo fica e maiores são as chances de nidificação das espécies terrestres, devido a redução da erosão e da movimentação de sedimentos, principalmente em áreas vegetadas (MUSSO *et al.*, 2020).

A maior abundância e diversidade de marcadores microbianos foram encontrados em solo poligonal (Figura 24). Em outras regiões da Antártica Marítima foi relatado uma maior diversidade microbiana em solos poligonais do que em outros tipos de formações de solos (BRINKMANN *et al.*, 2007; LAWLEY *et al.*, 2004; YERGEAU *et al.*, 2007). A estabilização de solos poligonais pode ocorrer em algumas décadas e com o distanciamento das geleiras (aproximadamente 1.343 m no sítio D-S2 de Demay Point), as interações entre processos abióticos e bióticos podem então prosseguir (HAUGLAND *et al.*, 2006). As comunidades vegetais, principalmente as dominadas por plantas criptoendolíticas, também apresentaram maior abundância e diversidade microbiana no solo. Áreas vegetadas da Antártica são oásis para as comunidades microbianas apresentando as maiores abundâncias e diversidade bacterianas (KRAUZE *et al.*, 2021), confirmando que a distância geográfica das geleiras, a estabilidade do solo e a cobertura vegetal influenciam as comunidades microbianas (YERGEAU *et al.*, 2007).

Os ambientes próximos às geleiras foram mais abundantes em bactérias, correlacionando negativamente com os sítios mais distantes (Figura 26). Dentre as bactérias totais foi possível identificar as redutoras de sulfato (SRB) e actinobactérias em áreas mais drenadas. Actinobactérias ocorreram em todos os sítios mais drenados nas cronosequências dos recuos, principalmente no recoo Demay Point. Em uma análise de cronosequência no Alasca Ártico, as actinobactérias foram abundantes em todos os sítios (KAO-KNIFFIN *et al.*, 2015). Esses organismos são reconhecidos por se estabelecerem em solos bem drenados, pH básico (faixa de pH dos sítios onde foram mais abundantes variou de 6,00 à 7,52 neste estudo) e degradar a matéria orgânica de diversas origens, principalmente compostos complexos (BRANT; MYROLD; SULZMAN, 2006; MAIER; PEPPER, 2009; MCCARTHY; WILLIAMS, 1992). Os marcadores de SRB foram encontrados em áreas bem drenadas, portanto não são bactérias anaeróbicas, se enquadrando em bactérias facultativas ou aeróbicas

(LIU *et al.*, 2018), podendo usar tanto compostos nitrogenados como o sulfato em suas atividades (MARIETOU, 2016).

Os ambientes distantes das geleiras proporcionaram o aumento de fungos em sítios mais drenados. Os fungos foram dominantes em solos sob comunidades vegetais (55%) e solo poligonal (66%), correlacionando positivamente com o distanciamento da geleira (Figura 26). Na Antártica Marítima, a temperatura do ar é a principal preditora para o aumento da diversidade fúngica, sugerindo aumentos entre 20-27% na riqueza de espécies para um ritmo de aquecimento de 0,34°C por década (NEWSHAM *et al.*, 2016). Porém, os marcadores fúngicos foram encontrados em todos os sítios dos recuos das geleiras. Portanto, é muito provável que o primeiro solo estéril isento de gelo obtenha seu inóculo fúngico da crioconita por meio de propágulos transportados pelo vento ou por estruturas fúngicas transportadas pela água das geleiras derretidas (DRESCH *et al.*, 2019).

Uma grande parcela da abundância dos ácidos graxos não foi atribuída a nenhum grupo específico de fungos. Tal fato não pode ser associado somente a restrições da técnica de PLFA, mas também a alta proporção de espécies não conhecidas na Antártica (DRESCH *et al.*, 2019). Os fungos, de maneira geral, foram agrupados com cascalhos, altitude, bactérias metanogênicas e uma pequena contribuição de carboidratos na MOP (Figura 27). Além disso, bactérias metanogênicas e fungos foram associados à Mg^{+2} , N total e N da MOAM (Figura 28). A associação de fungo com musgos fixados em cascalhos mostra uma relação de consumo de carboidrato da MOP produzidos pela vegetação, como verificado em líquens (ARMSTRONG *et al.*, 2015). Associado a estes sítios, há visitação de Skuas que podem contribuir através de guano para os teores de N total e na MOAM. Assim, com uma maior oferta de matéria orgânica, as bactérias metanogênicas são beneficiadas nesses solos úmidos (D-S3 e D-S7) e hidromórficos (D-S5) (ZHU *et al.*, 2009).

Com relação aos biomarcadores fúngicos foi possível identificar apenas o 18:1w9 como FMA (CAVARD *et al.*, 2011; GAVITO *et al.*, 2021; PINGREE *et al.*, 2022) atribuído, geralmente, a regiões temperadas, subtropicais e tropical. Em regiões polares são considerados ausentes, pois não há nenhum relato de FMA endêmicos (DAVISON *et al.*, 2015). Devidos às incertezas para os ecossistemas antárticos, o biomarcador 18:1w9 pode ser atribuído à fungos hepáticos como os simbioses micorrízicos ericóide *Rhizoscyphus ericae* e *Cephaloziella varians* conhecidos como endófitos septados escuros (NEWSHAM, 2010). Esses fungos endófitos possuem função ecológica semelhante aos FMA, realizando simbiose com a

vegetação e auxiliando na absorção de N e P na Antártica (ACUÑA-RODRÍGUEZ *et al.*, 2020; HILL *et al.*, 2019; NEWSHAM, 2010).

O biomarcador 18:1w9 foi agrupado com cascalhos acima de 4 mm e argila nos sítios mais distantes da geleira, estando também aliado a terpeno e carboidratos na MOAM (Figura 28). A associação com cascalhos e argila sugere relação deste com a comunidade vegetal. Com a retração das geleiras, os sítios mais distantes e os teores de argila condicionam a distribuição de espécies de fungos (SANTOS; MEYER; SETTE, 2020). Esse fato aumentou o biomarcador 18:1w9 que pode ser de fungos consumidores de carboidratos, beneficiado pela vegetação, assim como os fungos septados escuros. Com isso, o aumento do biomarcador 18:1w9, com o distanciamento das geleiras, em solos não-ornitogênicos, pode favorecer a absorção do P e N pelas plantas da Antártica Marítima (ACUÑA-RODRÍGUEZ *et al.*, 2020; HILL *et al.*, 2019; SANDERS, 2003).

Os efeitos da retração das geleiras sobre bactérias gram-negativas (G-) na ASPA 128 foi divergente do encontrado em um gradiente climático em ilhas da Antártica Marítima. Nas ilhas houve um aumento de bactérias G- associadas ao aumento de umidade e material vegetal fresco (HORROCKS *et al.*, 2020). Para os recuos, há uma tendência, mesmo nas áreas mais úmidas, de aumento de bactérias gram-positivas (G+). Isso provavelmente ocorre devido à instabilidade do ambiente e limitação dos recursos, desfavorecendo as bactérias G- que são provavelmente r estrategistas e favorecendo as bactérias G+ (k estrategistas) em ambientes frios, degradando hidrocarbonetos (MARGESIN *et al.*, 2003). Além disso, há a escassez de sistemas radiculares tanto de plantas inferiores (raízes pouco desenvolvidas em profundidade) como superiores (baixa densidade de *D. antarctica* e *C. quitensis*) no fornecimento de matéria orgânica derivados de plantas frescas para bactérias G- (FANIN *et al.*, 2019). As bactérias G+ também levam vantagem, pois são menos dependentes de matéria orgânica fresca e qualitativa, agrupando fortemente apenas com P_{rem} (Figura 27 28 7). Outro fator importante, é que bactérias G- são mais inibidas por cepas de fúngicas do que bactérias G+ na Antártica (ALBORES *et al.*, 2018), sendo afetadas pelo aumento de fungos na competição por recursos vegetais mais qualitativos como o carboidrato com a progressão das retrações das geleiras (Figura 26).

4.5 Conclusão

Os resultados revelaram que, a retração das geleiras na ASPA 128 aumentou a abundância e diversidade microbiana em solos mais drenados e estabilizados (solo poligonal e com cobertura vegetal mais densa). As bactérias foram associadas à P disponível e remanescente. A instabilidade climática da ASPA 128 torna os sítios mais adequados para bactérias G⁺ que são k estrategistas do que para bactérias G⁻, r estrategistas. A retração das geleiras favoreceu o aumento de fungos em solos mais drenados e de maior altitude.

4.6 Material suplementar

Tabela 15 – Tabela suplementar 8 (TS8) - Médias das frações granulométricas de solo coletado na camada de 0,00 – 0,10 m de sítios localizados em transectos a diferentes distâncias das geleiras dos recuos de Demay Point, Baranowski e Telephone Point localizados na ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima

Recuo / Sítios	Frações da amostra total do solo (g kg ⁻¹)				Granulometria do solo < 2mm (g kg ⁻¹)				Classe Textural
	>20 mm	20-4 mm	4-2 mm	<2 mm	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	
<i>Demay Point</i>									
D-S1	254,3	391,7	131,31	220,8	531,7	74,0	174,7	121,8	Franco arenosa
D-S2	345,6	303,8	163,43	421,2	295,9	95,7	352,6	126,4	Franca
D-S3	164,2	340,8	247,4	503,22	389,7	48,8	244,4	193,2	Franca
D-S4	99,7	266,5	154,6	413,67	494,1	320,3	210,4	121,6	Franco arenosa
D-S5	69,8	310,3	228,9	281,05	453,9	453,9	173,8	200,1	Franco arenosa
D-S6	102,0	374,2	600,0	705,00	437,6	49,8	221,2	205,9	Franca
D-S7	42,9	140,0	224,8	639,20	356,2	66,1	269,1	159,9	Franca
D-S8	317,2	234,3	280,7	693,00	463,5	45,0	169,5	199,2	Franco argilo arenoso
<i>Telephone Point</i>									
T-S1	248,3	343,4	106,4	301,94	512,8	78,0	91,5	170,5	Franco arenosa
T-S2	69,1	185,1	99,4	646,38	573,6	59,3	11,6	130,2	Areia franca
T-S3	33,4	63,6	84,6	818,31	613,8	36,4	201,6	10,0	Franco arenosa
<i>Baranowski</i>									
T-S1	469,4	124,9	66,4	339,26	533,4	78,5	266,2	27,8	Franco arenosa
T-S2	356,7	199,3	82,7	361,23	332,3	332,3	332,7	95,7	Franco arenosa
T-S3	319,8	67,7	41,4	571,06	332,3	332,3	343,3	22,9	Franco arenosa

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Tabela suplementar 9 (TS9) – Atributos químicos dos solos de amostras coletadas de sítios em transectos a diferentes distâncias das geleiras dos recuos de Demay Point, Baranowski e Telephone Point localizados na ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima

Recuo / Sítios	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTCe	CTC	V	m	P Rem
		----mg/dm ³ ----		-----Cmolc/dm ³ -----						----%----		mg/L	
<i>Demay Point</i>													
D-S1	5,8	151,0	168,0	5,5	11,7	1,2	6,7	17,7	18,9	24,4	72,5	6,6	27,8
D-S2	7,1	63,0	232,0	10,4	12,7	0,0	1,6	23,8	23,8	25,4	93,7	0,0	25,7
D-S3	7,3	105,3	136,0	21,9	15,4	0,0	0,6	37,7	37,7	38,3	98,4	0,0	35,1
D-S4	6,2	85,9	118,0	12,1	12,8	0,4	4,6	25,3	25,7	29,9	84,6	1,5	30,3
D-S5	6,7	113,0	178,0	22,7	10,7	0,0	1,1	33,9	33,9	35,0	96,9	0,0	43,3
D-S6	7,5	224,5	142,0	27,6	13,8	0,0	1,1	41,8	41,8	42,9	97,4	0,0	24
D-S7	6,1	70,3	178,0	18,8	21,6	0,7	3,5	40,8	41,5	44,3	92,1	1,6	28,1
D-S8	7,1	70,7	154,0	23,2	25,7	0,0	1,3	49,3	49,3	50,6	97,4	0,0	40,8
<i>Telephone Point</i>													
T-S1	5,8	3958,4	350,0	2,6	4,5	0,1	9,6	8,0	8,1	17,7	46,4	0,6	51,1
T-S2	4,9	340,2	540,0	15,6	7,9	2,2	6,7	24,9	27,1	31,6	78,8	8,2	25,7

T-S3	8,3	517,6	74,0	77,9	6,3	0,0	0,3	84,5	84,4	84,7	99,6	0,0	44,7
<i>Baranowski</i>													
B-S1	7,1	405,7	272,0	25,7	6,8	0,0	1,3	33,2	33,2	34,5	96,2	0,0	40,3
B-S2	8,4	250,0	96,0	25,2	4,6	0,0	0,2	30,0	30,0	30,3	99,3	0,0	46,3
B-S3	8,4	351,6	72,0	25,6	4,8	0,0	0,0	30,6	30,6	30,6	100,0	0,0	45,7

Fonte: elaborado pelo autor. *Nota:* Potencial hidrogeniônico (pH) em água; fósforo remanescente (P_{Rem}); cátion de potássio (K^+); fósforo disponível (P); soma de bases trocáveis (SB); capacidade de troca catiônica efetiva (CTC_e); capacidade de troca catiônica (CTC); saturação por bases (V); saturação por alumínio (m); alumínio (Al^{3+}); acidez potencial (H+Al); cátion de cálcio (Ca^{2+}) e cátion de magnésio (Mg^{2+}).

Tabela 17 – Tabela suplementar 10 (TS10) – Teores de C e N da matéria orgânica particulada (MOP), associada a minerais (MOAM) e total dos sítios de Baranowski (sítios B-S1, B-S2 e B-S3), Demay Point (sítios D-S1, D-S2, D-S3, D-S4, D-S5, D-S6, D-S7 e D-S8) e Telephone Point (sítios T-S1, T-S2 e T-S3) da ASPA 128, Ilha King George, Antártica Marítima

Recuo	Sítios	C – MOP (g kg-1)	C – MOAM (g kg-1)	C – Total (g kg-1)	N – MOP (g kg-1)	N – MOAM (g kg-1)	N – Total (g kg-1)
Baranowski	B-S1	2,60	0,36	1,60	0,00013	0,00036	0,00087
	B-S2	2,41	0,62	1,86	0,00000	0,00003	0,00001
	B-S3	2,41	0,37	1,37	0,00000	0,00000	0,00000
Demay Point	D-S1	3,35	4,85	4,38	0,00026	0,00053	0,00230
	D-S2	0,70	2,88	1,93	0,00000	0,00033	0,00019
	D-S3	1,24	1,60	1,58	0,00000	0,00023	0,00013
	D-S4	5,61	6,79	6,36	0,00045	0,00091	0,00265
	D-S5	8,23	8,81	8,52	0,00068	0,00109	0,00387
	D-S6	1,82	0,62	1,31	0,00000	0,00010	0,00004
	D-S7	3,49	0,46	2,33	0,00026	0,00034	0,00165
	D-S8	1,56	1,97	1,78	0,00000	0,00022	0,00012
Telephone Point	T-S1	35,10	21,71	32,89	0,00601	0,00237	0,04548
	T-S2	1,80	4,44	3,08	0,00023	0,00069	0,00145
	T-S3	2,33	1,86	2,24	0,00000	0,00000	0,00000
Total	-	5,53	4,97	5,78577	0,00065	0,00059	0,00493

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 18 - Tabela suplementar 11 (TS11) – Caracterização das moléculas extraídas de resíduos vegetais da ASPA 128 e tempo de retenção pela técnica de termoquimólise (THMA)

Organismo	Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
<i>U. antarctica</i>	Butane, 1,2,4-trimethoxy-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Aliphatic	4,13
	Nonane, 5-butyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	6,07
	Fructofuranose, 2,6-anhydro-1,3,4-tri-O-methyl-, .beta.-d-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	6,98
	2,4,5,6,7-Pentamethoxyheptanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Aliphatic	8,84
	9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86
	Tetracosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	31,47
<i>D. antártica</i>	Fructofuranose, 2,6-anhydro-1,3,4-tri-O-methyl-, .beta.-d-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	7,00
	Benzene, 4-ethenyl-1,2-dimethoxy-	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	7,06
	1,2,4-Trimethoxybenzene	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	7,11
	2-Propenoic acid, 3-(3,4-dimethoxyphenyl)-, methyl ester	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	15,59
	8-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	23,53
	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	24,56
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	25,55
	Docosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	28,44
	Tetracosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	32,09
	1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	33,78
	Hexacosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	35,52
<i>S. uncinata</i>	Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	11,83
	Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	12,64

Organismo	Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
	Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,06
	Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,94
	Nonacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	21,85
<i>P. crispa</i>	Heptadecane, 8-methyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	12,66
	Nonacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,06
	Heptadecane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	21,86
	Octacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	31,47
	Nonacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	33,22
Musgo	Nonane, 5-(2-methylpropyl)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	11,85
	Nonacosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,94
	5,5-Diethylpentadecane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,94
	Eicosanoic acid	Oxygenated	Lipid	carboxil acid	Aliphatic	17,11
Musgo morimbudo	Decane, 3-methyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	4,02
	Nonane, 5-(2-methylpropyl)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	6,08
	3-Hydroxymandelic acid, dimethyl ether, methyl ester	Oxygenated	Others	Ether/Esters	Aromatic	9,40
	8-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86
	Octadecanoic acid	Oxygenated	Lipid	carboxil acid	Aliphatic	21,28
	Methyl 18-methylnonadecanoate	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	24,53
	1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	26,48
	Docosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	28,44
<i>C. quitensis</i>	2-Pyrrolidone-5-carboxylic acid, N-methyl, methyl ester	MIX	Amino Acid	Amine	Cyclic aliphatic	6,79
	Myo-Inositol, 1,2,3,4,5,6-hexa-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Alcohol	Cyclic aliphatic	9,17
	Benzenepropanoic acid, 3,4-dimethoxy-, methyl ester	Oxygenated	Lignin route	Ether/Esters	Aromatic	12,29
	2-Propenoic acid, 3-(3,4-dimethoxyphenyl)-, methyl ester	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	15,64

Organismo	Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
	Hexadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	17,69
	Methyl 11-methoxyhexadecanoate	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,17
	7-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86
	6,9-Octadecadienoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	21,72
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	23,51
	17-Octadecynoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	24,55
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	26,39
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	26,97
	.alpha.-D-Glucopyranoside, phenyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	27,58
	Docosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	28,44
	1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	30,27
	Tetracosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	32,10
	Hexacosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	35,52
	1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	37,08
<i>U. aurantiaco-atra</i>	Butane, 1,2,4-trimethoxy-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Aliphatic	4,16
	1,2,4-Trimethoxybenzene	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	7,12
	2,4,5,6,7-Pentamethoxyheptanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Aliphatic	8,86
	9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,86

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Tabela suplementar 12 (TS12) – Caracterização das moléculas extraídas da matéria orgânica do solo da ASPA 128 e tempo de retenção pela técnica de termoquimólise (THMA)

Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
(+)-.alpha.-Tocopherol, O-methyl-	Oxygenated	Vitamin	Esters	Aromatic	37,385
.alpha.-D-Glucopyranoside, methyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	8,631
.beta.-D-Glucopyranoside, methyl 2,3,4,6-tetra-O-methyl-	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	8,445
1,2,4-Trimethoxybenzene	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	7,031
1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester	Oxygenated	Others	Esters	Aromatic	15,152
1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	Oxygenated	Others	Ketone	Cyclic aliphatic	4,439
1,4-Dioxaspiro[2.4]heptan-5-one, 7,7-dimethyl-	Oxygenated	Others	Ether	Cyclic aliphatic	6,714
13-Docosenamide, (Z)-	Mix	MAM	Amide	Aliphatic	33,116
13-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,875
1-Decanol, 2-hexyl-	Oxygenated	Lipid	Alcohol	Aliphatic	27,804
1-Docosanol, methyl ether	Oxygenated	Lipid	Ether	Aliphatic	33,804
1-Dodecene	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	5,166
1-Heptadecene	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	19,543
1-Hexadecanol	Oxygenated	Lipid	Alcohol	Aliphatic	15,264
1H-Isoindole-1,3(2H)-dione, 2-methyl-	Mix	NC	Amide	Aromatic	7,801
1-Octadecanol, methyl ether	Oxygenated	MAM	Ether	Aliphatic	18,305
1-Tetradecanol	Oxygenated	Others	Alcohol	Aliphatic	7,439
1-Tridecene	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	7,183
2,3,4-Trimethyl-d-xylose	Oxygenated	Carbohydrate	Aldehyde	Aliphatic	7,603
2,3,4-Trimethyllevoglucosan	Oxygenated	Carbohydrate	Ether	Cyclic aliphatic	7,339
2,5-Pyrrolidinedione, 1-methyl-	Mix	MAM	Amide	Cyclic aliphatic	4,357
2-Amino-5,6-dihydro-4,4,6-trimethyl-4H-1,3-oxazine	Mix	Others	Amine	Cyclic aliphatic	4,492
2-Butanone, diethylhydrazone	Nitrogenated	Others	Amide	Aliphatic	5,586

Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	Oxygenated	Others	Enol	Cyclic aliphatic	3,824
2-Dodecene, (E)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	5,375
2H-Pyran-2-one, tetrahydro-	Oxygenated	Others	Ether	Cyclic aliphatic	4,077
2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	Oxygenated	Others	Alcohol	Aliphatic	16,714
2-methylhexacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	22,126
2-Oxazolidinone, 3-amino-5-(4-morpholinylmethyl)-	Mix	Carbohydrate	Amine	Cyclic aliphatic	15,427
2-Pyrrolidone-5-carboxylic acid, N-methyl, methyl ester	Mix	NC	Amide	Cyclic aliphatic	6,835
5,10-Diethoxy-2,3,7,8-tetrahydro-1H,6H-dipyrrolo[1,2-a:1',2'-d]pyrazine	Mix	Bioactive	Amine	Aromatic	16,879
5,5-Diethyltridecane	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	16,06
5-Dodecene, (E)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	5,254
5-Isopropyl-2,4-imidazolidinedione	Mix	Others	Amide	Cyclic aliphatic	15,435
5-Tetradecene, (E)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	6,165
6-Tridecene, (E)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	6,2
9-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)-	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	30,159
9-Octadecenoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	19,887
Benzene, (1-methylundecyl)-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aromatic	13,8
Benzene, 1,4-dimethoxy-	Oxygenated	Lignin route	Ether	Aromatic	5,04
Cyclopentasiloxane, decamethyl-	Oxygenated	Others	Halides	Cyclic aliphatic	4,809
Decane, 1-iodo-	Hydrogenated	Others	Halides	Aliphatic	13,02
Decane, 3,6-dimethyl-	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	9,95
Decane, 3,7-dimethyl-	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	8,448
Docosa-2,6,10,14,18-pentaen-22-al, 2,6,10,15,18-pentamethyl-, all-trans	Oxygenated	Others	Aldehyde	Aliphatic	33,8
Docosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	33,25
Docosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Biop	Esters	Aliphatic	28,454
Dodecane, 2,6,11-trimethyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	9,471

Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
Dodecane, 2-methyl-	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	9,92
Dodecane, 2-methyl-6-propyl-	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	11,661
Dodecane, 4,6-dimethyl-	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	6,068
Dothiopin	Nitrogenated	Others	Halides	Aromatic	12,155
Eicosane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	12,003
Eicosane, 7-hexyl-	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	27,821
Eicosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	22,546
Heneicosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	36,566
Hentriacontane	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	12,086
Heptacosane	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	23,92
Heptadecane, 2-methyl-	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	12
Heptadecane, 8-methyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	13,005
Hexacosane	Hydrogenated	Lipid	Hydrocarbones	Aliphatic	23,906
Hexadecane, 1-iodo-	Hydrogenated	Others	Halides	Aliphatic	29,703
Hexadecanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	16,203
Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	25,976
Methyl stearate	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	20,436
Methyl tetradecanoate	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	12,162
Morpholine, 4-octadecyl-	Mix	MAM	Amine	Cyclic aliphatic	15,426
n-Hexadecanoic acid	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	17,083
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	20,536
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	21,406
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	16,073
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	16,96
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	21,398

Nome da molécula	Função orgânica do composto	Compostos orgânicos	Função orgânica	Caracterização química	Tempo de retenção
Nonacosane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	21,725
Nonadecanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	22,531
Octacosane	Hydrogenated	Others	Hydrocarbones	Aliphatic	27,83
Octadecanoic acid	Oxygenated	Lipid	Carboxylic acid	Aliphatic	21,304
Octadecanoic acid, 10-methyl-, methyl ester, (R)-	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	22,57
Octadecanoic acid, 17-methyl-, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	22,524
Octadecanoic acid, 2-(2-hydroxyethoxy)ethyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	21,271
Oleanitrile	Nitrogenated	Others	Amine	Aliphatic	27,796
Pentadecane	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	8,438
Pentadecanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	13,375
Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	Oxygenated	Lignin route	Alcohol	Aromatic	8,813
Stigmasta-5,22-diene, 3-methoxy-, (3.beta.,22E)-	Oxygenated	Lipid	Ether	Cyclic aliphatic	39,861
Sulfurous acid, 2-ethylhexyl octadecyl ester	Oxygenated	Others	Esters	Aliphatic	12,101
Tetracosane	Hydrogenated	Lipid	Hydrocarbones	Aliphatic	29,691
Tetracosanoic acid, methyl ester	Oxygenated	Lipid	Esters	Aliphatic	32,113
Tetradecane, 4-methyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	16,085
Tetratetracontane	Hydrogenated	Bioactive	Hydrocarbones	Aliphatic	33,225
Trichloroacetic acid, 2-tridecyl ester	Oxygenated	Others	Halides	Aliphatic	6,225
Undecane, 3,8-dimethyl-	Hydrogenated	Terpene	Hydrocarbones	Aliphatic	4,215

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Tabela suplementar 13 (TS14) – Os ácidos graxos fosfolipídicos (PLFA) do solo categorizados em: biomarcadores, grupos específicos e grupos funcionais

Biomarcador	Grupos específicos	Grupos funcionais	Referência
10Me-17:0	Actinomycetes	G+	Wang et al. (2015)
10Me-18:0	Actinomycetes	G+	Wang et al. (2015)
10Me 19:0	Actinomycetes	G+	Pan et al. (2021)
14:0	Unspecific biomarker	Unspecific biomarker	Baumert et al. (2018)
15:0	Unspecific biomarker	Unspecific biomarker	Shimizu (2017)
15:1 (n8)	Bacteria unspecific	Unspecific bacteria of G+ e G-	Perry et al. (1979)
16:0	Unspecific biomarker	Unspecific biomarker	Shimizu (2017)
16:1 (n9)	Bacteria unspecific	G-	Kotas et al. (2017)
17:0	Bacteria unspecific	Unspecific bacteria of G+ e G-	Baumert et al. (2018)
17:1 (n10)	<i>Bacillus</i>	G+	Singh et al. (2016)
18:0	Unspecific biomarker	Unspecific biomarker	Baumert et al. (2018)
18:1 (n11)	Bacteria-Microbial stress	G-	Ferré et al. (2012)
18:1 (n13) - (18:0)*	Unspecific biomarker	Unspecific biomarker	Shimizu (2017)
18:1 (n6) - (18:2n6)**	<i>Sporosarcina</i> sp.	G+	Wang et al. (2014)
18:1 (n9)	<i>Arbuscular mycorrhiza</i> - reducing nitrogen compounds	Fungi	Baumert et al. (2018)
18:2 (n9,12)	Ectomycorrhizal fungi	Fungi	Zechmeister-Boltenstern et al. (2011)
20:0	Aquatic plants/ moss	Plant	Sundh et al. (1997)
20:4 (n5,8,11,14)	Algae	Plant	Haewood (1998)
21:0	Algae	Plant	Sundh et al. (1997)
22:0	Aquatic plants/moss	Plant	Sundh et al. (1997)
22:1 (n21)	Zooplankton	Animal	(C22:1) Shimizu (2017)
23:0	Aquatic plants/moss	Plant	Sundh et al. (1997)
24:0	Aquatic plants/moss	Plant	Sundh et al. (1997)
24:1 (n9)	Fish	Animal	Turkkan et al. (2008)
25:0	Vascular plant	Plant	Sundh et al. (1997)

Biomarcador	Grupos específicos	Grupos funcionais	Referência
26:0	Vascular plant	Plant	Viso et al. (1993)
27:0	Algae	Plant	Viso et al. (1993)
35:1 (n17)	nd	nd	nd
44:0	Unspecific biomarker	Animal	Soberl et al. (2014)
a14:0	Aerobic bacteria	G+	Pan et al. (2021); Yan et al. (2018)
a16:0	Sulfate-reducing bacteria	G+	Kotas et al. (2017)
a16:1 (n8)	Methanogenic bacteria	G-	Ferré et al. (2012)
cy19:0	Bacteria-Anaerobes	G-	Huang et al. (2011)
i14:0	Aerobic Bacteria	G+	Pan et al. (2021)
i15:0	<i>Bacillus</i>	G+	Pan et al. (2021)
i16:0	Bacteria unspecific	G+	Pan et al. (2021)
i17:0	Bacteria unspecific	G+	Kotas et al. (2017)
i18:1 (n2)	nd	nd	nd
i26:0	nd	nd	nd
i28:0	nd	nd	nd

Fonte: elaborado pelo autor. Nota: Os marcadores de bactérias Gram-negativas e Gram-positivas foram abreviados para G- e G+, respectivamente. Atribuímos ácidos graxos de plantas aquáticas a biomarcadores de musgo neste estudo. *, **: modificação do biomarcador por desidrogenação e hidrogenação (Sargent et al., 1983; Mouhoub et al., 2018). nd: não determinado

Tabela 21 – Tabela suplementar 14 (TS14) – Caracterização de ácidos graxos fosfolipídios (PLFA) da matéria orgânica do solo da ASPA 128 e tempo de retenção

Nome da molécula	Biomarcador	Grupos específicos	Grupo funcional	Tempo de retenção
10-Nonadecenoic acid, methyl ester	19:1 ω 9	Bacteria	G-	21.69
11-Hexadecenoic acid, 15-methyl-, methyl ester	i16:0	bacteria	G+	15.45
11-Octadecenoic acid, methyl ester	18:1 (n11)	Bacteria-Microbial stress	G+	18.79
17-Pentatriacontene	35:1n17	nd	nd	30.94
1-Heneicosanol	21:0	Algae	Plant	18.25
1-Undecanamine, N,N-dimethyl-	nd	nd	nd	9.32
2-methylhexacosane	i26:0	Unspecific	Unspecific	31.75
4-Octadecenoic acid, methyl ester	18:1 (n3)	nd	nd	10.78
6-Octadecenoic acid, methyl ester, (Z)-	18:1 (n6)-(18:2n6)	Unspecific	Unspecific	10.98
8-Hexadecenal, 14-methyl-, (Z)-	a16:1 (n8)	Methanogenic bacteria	G-	13.47
9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z,Z,Z)-	18:3 (n9, 12,15)	Unspecific	Unspecific	18.81
9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester	18:2 (n9,12)	Ectomycorrhizal fungi	Fungi	18.49
9-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)-	15:1 (n8)	Bacteria	Bacteria	14.03
9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester	18:1 (n9)	Arbuscular mycorrhiza	Fungi	13.16
9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	18:1 (n9)	Arbuscular mycorrhiza	Fungi	18.64
Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, methyl ester	16:0	Unspecific	Unspecific	15.00
Cholest-4-en-3-one	nd	nd	nd	32.13
Cholesta-3,5-dien-7-one	nd	nd	nd	31.62

Nome da molécula	Biomarcador	Grupos específicos	Grupo funcional	Tempo de retenção
Cholesta-4,6-dien-3-ol, (3.beta.)-	nd	nd	nd	32.43
cis-10-Heptadecenoic acid, methyl ester	17:1 (n10)	Bacillus thuringiensis	G+	15.42
Cyclopropanooctanoic acid, 2-hexyl-, methyl ester	cy19::0	Anaerobic bacteria	G-	16.50
Docosanoic acid, methyl ester	22:0	Aquatic plants	Plant	29.97
Eicosanoic acid, methyl ester	20:0	Aquatic plants	Plant	22.04
Heneicosane	21:0	Algae	Plant	31.75
Heneicosanoic acid, methyl ester	21:0	Algae	Plant	8.92
Heptadecanoic acid, 10-methyl-, methyl ester	10Me-17:0	Astinomycetes	G+	17.83
Heptadecanoic acid, 16-methyl-, methyl ester	i17:0	Bacteria	G+	19.31
Heptadecanoic acid, methyl ester	26:0	Vascular plant	Plant	15.97
Hexacosanoic acid, methyl ester	26:0	Vascular plant	Plant	32.60
Hexadecanamide	16:0	Unspecific	Unspecific	20.91
Hexadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester	a16:0	Sulfate-reducing bacteria	G+	16.17
Hexadecanoic acid, 15-methyl-, methyl ester	i16:0	bacteria	G+	15.97
Hexadecanoic acid, methyl ester	16:0	Unspecific	Unspecific	14.52
Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	nd	nd	nd	27.16
Methyl hexadec-9-enoate	16:1 (n9)	Bacteria	G-	14.13
Methyl stearate	18:0	Unspecific	Unspecific	19.32
n-Tetracosanol-1	24:0	Aquatic plants	Plant	21.00
Octadecanal	18:0	Unspecific	Unspecific	24.95

Nome da molécula	Biomarcador	Grupos específicos	Grupo funcional	Tempo de retenção
Octadecanamide	18:0	Unspecific	Unspecific	22.71
Octadecanoic acid, 10-methyl-, methyl ester	10Me-18:0	Astinomycetes	G+	15.53
Octadecanoic acid, 17-methyl-, methyl ester	i18:0	Bacteria	G+	22.04
Octadecanoic acid, 3-hydroxy-2-tetradecyl-, methyl ester, (2R,3R)-	nd	nd	nd	29.97
Oxirane, hexadecyl-	nd	nd	nd	19.08
Pentadecanal-	15:0	Unspecific	Unspecific	19.23
Pentadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester	i15:0	Bacteria	G+	14.51
Pentadecanoic acid, methyl ester	15:0	Unspecific	Unspecific	11.27
Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	nd	nd	nd	5.55
Phenol, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-	nd	nd	nd	5.53
Tetracosamethyl-cyclododecasiloxane	nd	nd	nd	30.11
Tetracosanal	24:0	Aquatic plants	Plant	30.77
Tetracosane	24:0	Aquatic plants	Plant	30.52
Tetracosanoic acid, methyl ester	24:0	Aquatic plants	Plant	31.37
Tetradecanal	14:0	Unspecific	Unspecific	11.94
Tetrapentacontane	44:0	Unspecific	Animal	31.61
Tricosanoic acid, methyl ester	23:0	Aquatic plants	Plant	30.75
Tridecanoic acid, 12-methyl-, methyl ester	i14:0	Bacteria	G+	11.47

Fonte: elaborado pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que:

Com base na revisão de literatura, o aquecimento das paisagens não glaciais e o desenvolvimento dos solos na Península Antártica e Antártica Marítima melhoram as condições de recursos (nutrientes, resíduos orgânicos e condições térmica e hídrica) para vegetação superior, incrementando a rizosfera e aumentando a biomassa e atividade microbiana na subsuperfície do solo. Assim, o efeito do desenvolvimento do solo junto à comunidade microbiana e a vegetal promovem uma intensificação da ciclagem de nutrientes, emitindo mais CO₂. Com isso, as espécies de plantas superiores podem ter um papel importante no controle da degradação da matéria orgânica do solo.

Na Antártica Marítima, as análises de dados revelaram que o aquecimento climático favorece a colonização de fungos na superfície de solos bem drenados com a perda da influência e do distanciamento das geleiras no caso da ASPA 128. Em relação as mudanças na composição bioquímica da matéria orgânica, evidencia a perda de domínio de lipídios microbianos com a ocupação vegetal. Tal mudança na cobertura do solo promoveu o aumento de compostos orgânicos vegetais, tais como: biopolímeros, terpenos e carboidratos, o que gerou uma interação entres plantas, fungos e carboidratos. Além disso foi constatado o aumento da aromaticidade da matéria orgânica do solo.

Assim, com base nas análises de dados e de revisões de literatura, considera-se que as retrações das geleiras frente ao aquecimento climático na Península Antártica e Antártica Marítima promovem o aumento da atividade biótica do solo, principalmente plantas e microrganismos, mudando a composição bioquímica do solo e da matéria orgânica por meio do aumento da cobertura vegetal, do alumínio e de compostos mais aromáticos, conforme o solo se tornam mais drenados e intemperizados.

REFERÊNCIAS

- ABAKUMOV, E. Characterisation of humic acids, isolated from selected sub-antarctic soils by ¹³C-NMR spectroscopy. **Czech Polar Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–10, 1 jan. 2017.
- ABAKUMOV, E.; ALEKSEEV, I. Stability of soil organic matter in Cryosols of the maritime Antarctic: insights from ¹³C NMR and electron spin resonance spectroscopy. **Solid Earth**, v. 9, n. 6, p. 1329–1339, 19 nov. 2018.
- ABAKUMOV, E.; MUKHAMETOVA, N. Microbial biomass and basal respiration of selected Sub-Antarctic and Antarctic soils in the areas of some Russian polar stations. **Solid Earth**, v. 5, n. 2, p. 705–712, 29 jul. 2014.
- ABAKUMOV, E.; YANEVA, R.; POLYAKOV, V.; ZHIYANSKI, M. Characterization of Humic Acids Isolated from Selected Soils of Livingston Island by CP/MAS ¹³C NMR and ESR Spectroscopy. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2022, p. 1–12, 5 ago. 2022.
- ACUÑA-RODRÍGUEZ, I. S.; GALÁN, A.; TORRES-DÍAZ, C.; ATALA, C.; MOLINA-MONTENEGRO, M. A. Fungal Symbionts Enhance N-Uptake for Antarctic Plants Even in Non-N Limited Soils. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, 23 out. 2020.
- ALBORES, S., *et al.* Biodiversity and antimicrobial activity of Antarctic fungi from the Fildes Peninsula, King George Island. **Sydowia**, v. 70, p. 185-191, 2018. DOI 10.12905/0380.sydowia70-2018-0185
- ALEKSEEV, I.; ZVEREV, A.; ABAKUMOV, E. Microbial Communities in Permafrost Soils of Larsemann Hills, Eastern Antarctica: Environmental Controls and Effect of Human Impact. 2020.
- ALLEMANN, R. K. Chemical wizardry? The generation of diversity in terpenoid biosynthesis. **Pure and Applied Chemistry**, v. 80, n. 8, p. 1791–1798, 1 jan. 2008.
- ALMEIDA, I. C. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES, R. B. A.; OLIVEIRA, F. S.; PEREIRA, T. T. C. Clay mineralogy and micropedology of phosphate-rich soils from Lions Rump, Maritime Antarctica. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 105, 1 jan. 2021.
- ALMEIDA, I. C.; SCHAEFER, C. E. G.; FERNANDES, R. B., *et al.* Active layer thermal regime at different vegetation covers at Lions Rump, King George Island, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, 225, 36-46, 2014.
- ANDRIUZZI, W. S.; ADAMS, B. J.; BARRETT, J. E.; VIRGINIA, R. A.; WALL, D. H. Observed trends of soil fauna in the Antarctic Dry Valleys: early signs of shifts predicted under climate change. **Ecology**, v. 99, n. 2, p. 312–321, 5 fev. 2018.

- ANGIEL, P. J.; DAŃSKI, M. Lichenometric ages of the little ice age moraines on king george island and of the last volcanic activity on penguin island (west antarctica). **Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography**, v. 94, n. 3, p. 395–412, 15 set. 2012.
- ARENZ, B. E.; BLANCHETTE, R. A. Distribution and abundance of soil fungi in Antarctica at sites on the Peninsula, Ross Sea Region and McMurdo Dry Valleys. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 2, p. 308–315, fev. 2011.
- ARMSTRONG, A.; WALDRON, S.; OSTLE, N. J.; RICHARDSON, H.; WHITAKER, J. Biotic and Abiotic Factors Interact to Regulate Northern Peatland Carbon Cycling. **Ecosystems**, v. 18, n. 8, p. 1395–1409, 2015.
- AYRES, E.; NKEM, J. N.; WALL, D. H.; ADAMS, B. J.; BREANA, J. E. B.; VIRGINIA, R. A.; FOUNTAIN, A. G. Experimentally increased snow accumulation alters soil moisture and animal community structure in a polar desert. p. 897–907, 2010.
- BAIG, I. A.; HOPTON, J. W. Psychrophilic properties and the temperature characteristic of growth of bacteria. **Journal of Bacteriology**, v. 100, n. 1, p. 552–553, 1969.
- BAJERSKI, F.; WAGNER, D.; MANGELSDORF, K. Cell membrane fatty acid composition of *Chryseobacterium frigidisoli* PB4T, isolated from antarctic glacier forefield soils, in response to changing temperature and pH conditions. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, n. APR, 19 abr. 2017.
- BALKS, M. R.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; GORYACHKIN, S. V.; MERGELOV, N. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; ALMOND, P. C.; CLARIDGE, G. G. C.; MCLEOD, M.; SCARROW, J. Windows on Antarctic soil-landscape relationships: Comparison across selected regions of Antarctica. **Geological Society Special Publication**, v. 381, n. 1, p. 397–410, 2013.
- BALL, B. A.; VIRGINIA, R. A. Microbial biomass and respiration responses to nitrogen fertilization in a polar desert. **Polar Biology**, v. 37, n. 4, p. 573–585, 2014.
- BARILLOT, C. D. C.; SARDE, C. O.; BERT, V.; TARNAUD, E.; COCHET, N. A standardized method for the sampling of rhizosphere and rhizoplan soil bacteria associated to a herbaceous root system. **Annals of Microbiology**, v. 63, n. 2, p. 471–476, 2013.
- BARRETT, A.; ROSS, A.; ANDREW, N.; DIANA, H.; VIRGINIA, R. A.; PARSONS, A. N.; WALL, D. H. Potential Soil Organic Matter Turnover in Taylor Valley , Antarctica University of Colorado Potential Soil Organic Matter Turnover in Taylor Valley , Antarctica. v. 37, n. 1, p. 108–117, 2005.
- BARRETT, J. E.; VIRGINIA, R. A.; HOPKINS, D. W.; AISLABIE, J.; BARGAGLI, R.; BOCKHEIM, J. G.; CAMPBELL, I. B.; LYONS, W. B.; MOORHEAD, D. L.; NKEM, J. N.; SLETTEN, R. S.; STELTZER, H.; WALL, D. H.; WALLENSTEIN, M. D. Terrestrial ecosystem processes of Victoria Land, Antarctica. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 10, p. 3019–3034, out. 2006.
- BARSCH, Dietrich; BLÜMEL, Wolf-Dieter. Untersuchungen zum Periglazial auf der König-Georg-Insel, Südshetlandinseln/Antarktika: Deutsche physiogeographische Forschungen in

der Antarktis; Bericht über die Kampagne 1983/84. **Berichte zur Polarforschung (Reports on Polar Research)**, v. 24, 1985.

BEERLING, D. J. The influence of vegetation cover on soil organic matter preservation in Antarctica during the Mesozoic. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 2, p. 253–256, 2000.

BENAVENT-GONZÁLEZ, A.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; FERNÁNDEZ-BRUN, L. Europe PMC Funders Group Identity of plant, lichen and moss species connects with microbial abundance and soil functioning in Maritime Antarctica. v. 429, p. 35–52, 2019.

BENAVENT-GONZÁLEZ, A.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; FERNÁNDEZ-BRUN, L.; SINGH, B. K.; MAESTRE, F. T.; SANCHO, L. G. Identity of plant, lichen and moss species connects with microbial abundance and soil functioning in maritime Antarctica. **Plant and Soil**, v. 429, n. 1–2, p. 35–52, 2018.

BENTLEY, Mike J. et al. Mechanisms of Holocene palaeoenvironmental change in the Antarctic Peninsula region. **The Holocene**, v. 19, n. 1, p. 51–69, 2009.

BERGSTROM, D. M. (Dana M.); CONVEY, P. (Pete); HUISKES, A. H. L. **Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems : Antarctica as a global indicator**. [s.l.] Springer, 2006. 369 p.

BEYER, L.; BOCKHEIM, J. G.; CAMPBELL, I. B.; CLARIDGE, G. G. C. **Genesis, properties and sensitivity of Antarctic Gelisols** Antarctic Science Cambridge University Press, 1999.

BEYER, L.; BÖLTER, M.; SEPPELT, R. D. Nutrient and Thermal Regime, Microbial Biomass, and Vegetation of Antarctic Soils in the Windmill Islands Region of East Antarctica (Wilkes Land). **Arctic, Antarctic, and Alpine Research**, v. 32, n. 1, p. 30–39, 2000.

BEYER, Lothar et al. Small-distance variation of carbon and nitrogen storage in mineral Antarctic cryosols near Casey Station (Wilkes Land). **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 161, n. 3, p. 211–220, 1998.

BEYER, Lothar et al. Soil formation in coastal continental Antarctica (Wilkes Land). **Geoderma**, v. 95, n. 3–4, p. 283–304, 2000.

BEYER, L.; SORGE, C.; BLUME, H.-P.; SCHULTEN, H.-R. Soil organic matter composition and transformation in gelic histosols of coastal continental Antarctica. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 10, p. 1279–1288, out. 1995.

BEYER, L.; VOGT, B.; BLUME, H.; ERLLENKEUSER, H. Soil Organic Matter Composition and Transformation in a Swamp Soil from Algae of Coastal Continental Antarctica. **Polarforschung**, v. 65, n. 3, p. 117–122, 1998.

BEYER, L.; WHITE, D. M.; BÖLTER, M. Soil organic matter composition, transformation, and microbial colonisation of Gelic Podzols in the coastal region of East Antarctica. **Australian Journal of Soil Research**, v. 39, n. 3, p. 543–563, 2001.

- BOCKHEIM, J.; VIEIRA, G.; RAMOS, M.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; SERRANO, E.; GUGLIELMIN, M.; WILHELM, K.; NIEUWENDAM, A. Climate warming and permafrost dynamics in the Antarctic Peninsula region. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 215–223, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.018>>.
- BÖLTER, M. Distribution of bacterial numbers and biomass in soils and on plants from King George Island (Arctowski Station, Maritime Antarctica). **Polar Biology**, v. 15, n. 2, p. 115–124, 1995.
- BORGES, L. P.; AMORIM, V. A. METABÓLITOS SECUNDÁRIOS DE PLANTAS SECONDARY PLANT METABOLITES. **Plant Physiology**, p. 590–610, 2020.
- BOY, J.; GODOY, R.; SHIBISTOVA, O.; BOY, D.; MCCULLOCH, R.; ANDRINO, A.; FUENTE, D.; MORALES, M. A.; MIKUTTA, R.; GUGGENBERGER, G. Successional patterns along soil development gradients formed by glacier retreat in the Maritime Antarctic, King George Island. **Revista Chilena de Historia Natural**, p. 1–17, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1186/s40693-016-0056-8>>.
- BRAGAZZA, L.; ROBROEK, B. J. M.; JASSEY, V. E. J.; ARIF, M. S.; MARCHESINI, R.; GUGLIELMIN, M.; CANNONE, N. Soil microbial community structure and enzymatic activity along a plant cover gradient in Victoria Land (continental Antarctica). **Geoderma**, v. 353, p. 144–151, nov. 2019.
- BRANT, J. B.; MYROLD, D. D.; SULZMAN, E. W. Root controls on soil microbial community structure in forest soils. **Oecologia**, v. 148, n. 4, p. 650–659, jul. 2006. . Acesso em: 22 mar. 2022.
- BRINKMANN, M.; PEARCE, D. A.; CONVEY, P.; OTT, S. The cyanobacterial community of polygon soils at an inland Antarctic nunatak. **Polar Biology**, v. 30, n. 11, p. 1505–1511, 5 set. 2007.
- BROOKES, P. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. p. 269–279, 1995.
- BROOKS, S. T.; JABOUR, J.; VAN DEN HOFF, J.; BERGSTROM, D. M. Our footprint on Antarctica competes with nature for rare ice-free land. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 3, p. 185–190, 1 mar. 2019.
- BRÜGGEMANN, N.; GESSLER, A.; KAYLER, Z., et al. Carbon allocation and carbon isotope fluxes in the plant-soil-atmosphere continuum: a review. **Biogeosciences**, 8(11), 3457–3489, 2011.
- BURKINS, M. B.; VIRGINIA, R. A.; CHAMBERLAIN, C. P.; WALL, D. H. Origin and distribution of soil organic matter in Taylor Valley, Antarctica. **Ecology**, v. 81, n. 9, p. 2377–2391, 2000.
- BURKINS, M. B.; VIRGINIA, R. A.; WALL, D. H. Organic carbon cycling in Taylor Valley, Antarctica: quantifying soil reservoirs and soil respiration. **Global Change Biology**, v. 7, n. 1, p. 113–125, jan. 2001.

BUURMAN, P.; JONGMANS, A. G. Podzolisation and soil organic matter dynamics. **Geoderma**, v. 125, n. 1–2, p. 71–83, mar. 2005.

CAMBARDELLA, Cynthia A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil science society of America journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.

CAMPBELL, C. A.; BIEDERBECK, V. O.; ZENTNER, R. P.; LAFOND, G. P. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 71, n. 3, p. 363–376, 1991.

CANNONE, N.; GUGLIELMIN, M. Influence of vegetation on the ground thermal regime in continental Antarctica. **Geoderma**, v. 151, n. 3–4, p. 215–223, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.007>>.

CANNONE, N.; WAGNER, D.; HUBBERTEN, H. W.; GUGLIELMIN, M. Biotic and abiotic factors influencing soil properties across a latitudinal gradient in Victoria Land, Antarctica. v. 144, p. 50–65, 2008.

CARBONE, M. S.; TRUMBORE, S. E. Contribution of new photosynthetic assimilates to respiration by perennial grasses and shrubs: residence times and allocation patterns. **New Phytologist**, 176(1), 124–135, 2007.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. Microbiologia do solo. **Microbiologia do solo**, 2016.

CASTRO, M. F.; NEVES, J. C. L.; FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; OLIVEIRA, T. S. Seabirds enrich Antarctic soil with trace metals in organic fractions. **Science of the Total Environment**, v. 785, 1 set. 2021.

CAVARD, X.; MACDONALD, S. E.; BERGERON, Y.; CHEN, H. Y. H. Importance of mixedwoods for biodiversity conservation: Evidence for understory plants, songbirds, soil fauna, and ectomycorrhizae in northern forests. **Environmental Reviews**, v. 19, n. 1, p. 142–161, 2011.

CHEFETZ, B.; CHEN, Y.; CLAPP, C. E. Characterization of Organic Matter in Soils by Thermochemolysis Using Tetramethylammonium Hydroxide (TMAH). n. March, 2000.

CHEN, X.; LIU, X.; WEI, Y.; HUANG, Y. Production of long-chain n-alkyl lipids by heterotrophic microbes: New evidence from Antarctic lakes. **Organic Geochemistry**, v. 138, p. 103909, dez. 2019.

CHEN, Y.; MA, S.; JIANG, H.; HU, Y.; LU, X. Influences of litter diversity and soil moisture on soil microbial communities in decomposing mixed litter of alpine steppe species. **Geoderma**, v. 377, n. March, p. 114577, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114577>>.

- CHOU, L.; KENIG, F.; MURRAY, A. E.; FRITSEN, C. H.; DORAN, P. T. Effects of legacy metabolites from previous ecosystems on the environmental metabolomics of the brine of Lake Vida, East Antarctica. **Organic Geochemistry**, v. 122, p. 161–170, ago. 2018.
- COOK, A. J.; FOX, A. J.; VAUGHAN, D. G.; FERRIGNO, J. G. Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. **Science**, v. 308, n. 5721, p. 541–544, 22 abr. 2005.
- DĄBSKI, M.; ZMARZ, A.; PABJANEK, P.; KORCZAK-ABSHIRE, M.; KARSZNIA, I.; CHWEDORZEWSKA, K. J. UAV-based detection and spatial analyses of periglacial landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). **Geomorphology**, v. 290, n. April, p. 29–38, 2017.
- DĄBSKI, M.; ZMARZ, A.; RODZEWICZ, M.; KORCZAK-ABSHIRE, M.; KARSZNIA, I.; LACH, K.; RACHLEWICZ, G.; CHWEDORZEWSKA, K. Mapping Glacier Forelands Based on UAV BVLOS Operation in Antarctica. **Remote Sensing**, v. 12, n. 4, p. 630, 14 fev. 2020.
- DAHER, M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; THOMAZINI, A.; DE LIMA NETO, E.; SOUZA, C. D.; DO VALE LOPES, D. Ornithogenic soils on basalts from maritime Antarctica. **Catena**, v. 173, p. 367–374, 1 fev. 2019.
- DAI, Z.; YU, M.; CHEN, H.; ZHAO, H.; HUANG, Y.; SU, W.; XIA, F.; CHANG, S. X.; BROOKES, P. C.; DAHLGREN, R. A.; XU, J. Elevated temperature shifts soil N cycling from microbial immobilization to enhanced mineralization, nitrification and denitrification across global terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**, v. 26, n. 9, p. 5267–5276, 2 set. 2020.
- DAVIS, R. C. Environmental factors influencing decomposition rates in two Antarctic moss communities. **Polar Biology**, v. 5, n. 2, p. 95–103, 1986.
- DAVISON, J.; MOORA, M.; ÖPIK, M.; ADHOLEYA, A.; AINSAAR, L.; BÂ, A.; BURLA, S.; DIEDHIU, A. G.; HIIESALU, I.; JAIRUS, T.; JOHNSON, N. C.; KANE, A.; KOOREM, K.; KOCHAR, M.; NDIAYE, C.; PÄRTEL, M.; REIER, Ü.; SAKS, Ü.; SINGH, R.; VASAR, M.; ZOBEL, M. Global assessment of arbuscular mycorrhizal fungus diversity reveals very low endemism. **Science**, v. 349, n. 6251, p. 970–973, 28 ago. 2015.
- DE AQUINO, A. M.; CANELLAS, L. P.; DA SILVA, A. P. S.; CANELLAS, N. O.; DA S LIMA, L.; OLIVARES, F. L.; PICCOLO, A.; SPACCINI, R. Evaluation of molecular properties of humic acids from vermicompost by ¹³C-CPMAS-NMR spectroscopy and thermochemolysis–GC–MS. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 141, n. January, p. 104634, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104634>>.
- DE SOUZA CARVALHO, J. V.; DE SÁMENDONÇA, E.; LA SCALA, N.; REIS, C.; REIS, E. L.; SCHAEFER, C. E. G. R. CO₂-C losses and carbon quality of selected Maritime Antarctic soils. **Antarctic Science**, v. 25, n. 1, p. 11–18, 2013.
- DEL RIO, J. C.; MCKINNEY, D. E.; KNICKER, H.; NANNY, M. A.; MINARD, R. D.; HATCHER, P. G. Structural characterization of bio- and geo-macromolecules by off-line

thermochemolysis with tetramethylammonium hydroxide. **Journal of Chromatography A**, v. 823, n. 1–2, p. 433–448, out. 1998.

DENG, L.; PENG, C.; KIM, D.-G.; LI, J.; LIU, Y.; HAI, X.; LIU, Q.; HUANG, C.; SHANGGUAN, Z.; KUZYAKOV, Y. Drought effects on soil carbon and nitrogen dynamics in global natural ecosystems. **Earth-Science Reviews**, v. 214, p. 103501, mar. 2021.

DESHMUKH, A. P.; CHEFETZ, B.; HATCHER, P. G. Characterization of organic matter in pristine and contaminated coastal marine sediments using solid-state ¹³C NMR, pyrolytic and thermochemolytic methods: A case study in the San Diego harbor area. **Chemosphere**, v. 45, n. 6–7, p. 1007–1022, 2001.

DEYN, G. B.; CORNELISSEN, J. H.; BARDGETT, R. D. (2008). Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology letters*, 11(5), 516-531.

DING, Y.; MU, C.; WU, T.; HU, G.; ZOU, D.; WANG, D.; LI, W.; WU, X. Increasing cryospheric hazards in a warming climate. **Earth-Science Reviews**, v. 213, p. 103500, fev. 2021.

DO VALE LOPES, D.; ERNESTO SCHAEFER, C. G.; JOÃO LELIS LEAL DE SOUZA, J.; SOARES DE OLIVEIRA, F.; NOGUEIRA BELLO SIMAS, F.; DAHER, M.; FEITAL GJORUP, D. Concretionary horizons, unusual pedogenetic processes and features of sulfate affected soils from Antarctica. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.024>>.

DO VALE LOPES, D.; SOARES DE OLIVEIRA, F.; PEREIRA, T. T. C.; SCHAEFER, C. E. G. R. Pedogeomorphology and weathering at Snow Island, Maritime Antarctica. **CATENA**, v. 217, p. 106515, out. 2022.

DOMMERGUES, Y. R.; BELSER, L. W.; SCHMIDT, E. L. Limiting Factors for Microbial Growth and Activity in Soil. **Advances in microbial ecology**, p. 49–104, 1978.

DRESCH, P.; FALBESONER, J.; ENNEMOSER, C.; HITTORF, M.; KUHNERT, R.; PEINTNER, U. Emerging from the ice-fungal communities are diverse and dynamic in earliest soil developmental stages of a receding glacier. **Environmental Microbiology**, v. 21, n. 5, p. 1864–1880, 11 maio 2019.

EIDEN, G. Land-cover and land-use mapping. **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)**, v. I, n. 4, p. 9, 2009. Disponível em: <<http://nora.nerc.ac.uk/13043/>>.

ELBERLING, B.; GREGORICH, E. G.; HOPKINS, D. W.; SPARROW, A. D.; NOVIS, P.; GREENFIELD, L. G. Distribution and dynamics of soil organic matter in an Antarctic dry valley. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 10, p. 3095–3106, 2006.

ELLIS, L.; SINGH, R. K.; ALEXANDER, R.; KAGI, R. I. Formation of isohexyl alkylaromatic hydrocarbons from aromatization-rearrangement of terpenoids in the sedimentary environment: A new class of biomarker. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 60, n. 23, p. 4747–4763, dez. 1996.

ESTOURNEL-PELARDY, C.; DELARUE, F.; GRASSET, L.; LAGGOUN-DÉFARGE, F. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Tetramethylammonium hydroxide thermochemolysis for the analysis of cellulose and free carbohydrates in a peat bog. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 92, n. 2, p. 401–406, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2011.08.004>>.

EVERETT, K. R. **A survey of the soils in the region of the South Shetland Islands and adjacent parts of the Antarctic Peninsula**. Research Foundation and the Institute of Polar Studies, The Ohio State University, 1976.

FANIN, N.; KARDOL, P.; FARRELL, M.; NILSSON, M. C.; GUNDALE, M. J.; WARDLE, D. A. The ratio of Gram-positive to Gram-negative bacterial PLFA markers as an indicator of carbon availability in organic soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 128, n. September 2018, p. 111–114, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.10.010>>.

FARIA, A. L. L. SOLOS, GEOMORFOLOGIA E RELAÇÕES ECOLÓGICAS NA PARTE SUDOESTE DA PENÍNSULA DE BYERS, ILHA LIVINGSTON, ANTÁRTICA MARÍTIMA. **Universidade Federal de Viçosa**, p. 96, 2010.

LEITE, Luiz Fernando Carvalho; ARAÚJO, Ademir Sérgio Ferreira. *Ecologia microbiana do solo*. 2007.

FERON, S.; CORDERO, R. R.; DAMIANI, A.; MALHOTRA, A.; SECKMEYER, G.; LLANILLO, P. Warming events projected to become more frequent and last longer across Antarctica. **Scientific Reports** |, v. 11, p. 19564, 2021.

FERRARI, F. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; PEREIRA, A. B.; THOMAZINI, A.; SCHMITZ, D.; FRANCELINO, M. R. Coupled soil-vegetation changes along a topographic gradient on King George Island, maritime Antarctica. **CATENA**, v. 198, p. 105038, mar. 2021.

FERRARI, Flávia Ramos. *Relações solo-vegetação e implicações ambientais em topossequência na Ilha Rei George, Antártica Marítima*. 2018.

FERREIRA, A.; VIEIRA, G.; RAMOS, M.; NIEUWENDAM, A. Ground temperature and permafrost distribution in Hurd Peninsula (Livingston Island, Maritime Antarctic): An assessment using freezing indexes and TTOP modelling. **Catena**, v. 149, p. 560–571, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.027>>.

FIRTH, C. R.; STEWART, I. S. Tectônica pós-glacial do centro de elevação glacio-isostático escocês. **Quaternary Science Reviews**, 19(14-15), 1469-1493, 2000.

FISHER, J. P.; ESTOP-ARAGONÉS, C.; THIERRY, A.; CHARMAN, D. J.; WOLFE, S. A.; HARTLEY, I. P.; MURTON, J. B.; WILLIAMS, M.; PHOENIX, G. K. The influence of vegetation and soil characteristics on active-layer thickness of permafrost soils in boreal forest. **Global change biology**, v. 22, n. 9, p. 3127–3140, 2016.

FORTES RODRIGUES, W.; SOARES DE OLIVEIRA, F.; ERNESTO SCHAEFER, C. G.; GARCIA PRAÇA LEITE, M.; SÉRGIO PAVINATO, P. *Phosphatization under birds'*

activity: Ornithogenesis at different scales on Antarctic Soils. **Geoderma**, v. 391, p. 114950, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114950>>.

FOUNTAIN, A. G.; CAMPBELL, J. L.; SCHUUR, E. A. G.; STAMMERJOHN, S. E.; WILLIAMS, M. W.; DUCKLOW, H. W. The Disappearing Cryosphere: Impacts and Ecosystem Responses to Rapid Cryosphere Loss. **BioScience**, v. 62, n. 4, p. 405–415, abr. 2012.

FOUNTAIN, A. G.; NYLEN, T. H.; MONAGHAN, A.; BASAGIC, J.; BROMWICH, D. Snow in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. v. 642, n. May 2009, p. 633–642, 2010.

FRANCELINO, Márcio Rocha. Geoprocessamento aplicado ao monitoramento ambiental da Antártica Marítima: solos, geomorfologia e cobertura vegetal da Península Keller. 2004.

FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C.; BROMWICH, D. H.; JONES, P.; KING, J. C.; LAZZARA, M. A.; RENWICK, J.; SOLOMON, S.; BRUNET, M.; CERVENY, R. S. WMO Evaluation of Two Extreme High Temperatures Occurring in February 2020 for the Antarctic Peninsula Region. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 102, n. 11, p. E2053–E2061, nov. 2021.

FRANCELINO, Márcio Rocha et al. WMO evaluation of two extreme high temperatures occurring in february 2020 for the Antarctic Peninsula Region. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 102, n. 11, p. E2053-E2061, 2021.

FRAZIER, S. W.; NOWACK, K. O.; GOINS, K. M.; CANNON, F. S.; KAPLAN, L. A.; HATCHER, P. G. Characterization of organic matter from natural waters using tetramethylammonium hydroxide thermochemolysis GC-MS. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 70, n. 1, p. 99–128, 2003.

GARRIDO-BENAVENT, I.; PÉREZ-ORTEGA, S.; DURÁN, J.; ASCASO, C.; POINTING, S. B.; RODRÍGUEZ-CIELOS, R.; NAVARRO, F.; DUMONT, M. G. Differential Colonization and Succession of Microbial Communities in Rock and Soil Substrates on a Maritime Antarctic Glacier Forefield. v. 11, n. February, p. 1–19, 2020.

GAVITO, M. E.; COHEN-SALGADO, D.; NOGUEZ, A. M.; VEGA-PEÑA, E. V. In-situ local litter decomposition was mainly microbial and differed between pastures and mature forests but not along early succession in a tropical dry forest ecosystem. **Forest Ecology and Management**, v. 480, p. 118636, jan. 2021.

GILICHINSKY, D. A.; WILSON, G. S.; FRIEDMANN, E. I.; MCKAY, C. P.; SLETTEN, R. S.; RIVKINA, E. M.; VISHNIVETSKAYA, T. A.; EROKHINA, L. G.; IVANUSHKINA, N. E. Research Paper. v. 7, n. 2, 2007.

GLEIN, C. R.; ZOLOTOV, M. Yu. Hydrogen, Hydrocarbons, and Habitability Across the Solar System. **Elements**, v. 16, n. 1, p. 47–52, 1 fev. 2020.

GONG, S.; WANG, H.; LIU, Y.; ZHANG, X.; WANG, L.; LIU, G. Experimental and Kinetic Modeling of Biomass Derived Hydrocarbon *p*-Menthane Pyrolysis. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 10, p. 12634–12645, 15 out. 2020.

GRASSET, L.; AMBLE, A. Structural study of soil humic acids and humin using a new preparative thermochemolysis technique. v. 47, p. 1–12, 1998.

GUGLIELMIN, M.; DALLE FRATTE, M.; CANNONE, N. Permafrost warming and vegetation changes in continental Antarctica. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 4, p. 045001, 2014.

HAUGLAND, Jake E. Short-term periglacial processes, vegetation succession, and soil development within sorted patterned ground: Jotunheimen, Norway. **Arctic, Antarctic, and alpine research**, v. 38, n. 1, p. 82-89, 2006. DOI: 10.1657/1523-0430(2006)038[0082:SPPVSA]2.0.CO;2

HILL, P. W.; BROUGHTON, R.; BOUGOURE, J.; HAVELANGE, W.; NEWSHAM, K. K.; GRANT, H.; MURPHY, D. V.; CLODE, P.; RAMAYAH, S.; MARSDEN, K. A.; QUILLIAM, R. S.; ROBERTS, P.; BROWN, C.; READ, D. J.; DELUCA, T. H.; BARDGETT, R. D.; HOPKINS, D. W.; JONES, D. L. Angiosperm symbioses with non-mycorrhizal fungal partners enhance N acquisition from ancient organic matter in a warming maritime Antarctic. **Ecology Letters**, v. 22, n. 12, p. 2111–2119, 2019.

HOLLY, V.; MING, A.; CAILLON, N.; HAUGE, L.; E. JONES, A.; SAVARINO, J.; YANG, X.; M. FREY, M. Deposition, recycling, and archival of nitrate stable isotopes between the air-snow interface: comparison between Dronning Maud Land and Dome C, Antarctica. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, n. 9, p. 5861–5885, 15 maio 2020.

HOPKINS, D. W.; DENNIS, P. G.; NEWSHAM, K. K.; DONNELL, T. G. O.; RUSHTON, S. P. Lean and keen : Microbial activity in soils from the Maritime Antarctic. n. March, p. 1–19, 2020.

HOPKINS, D. W.; SPARROW, A. D.; GREGORICH, E. G.; ELBERLING, B.; NOVIS, P.; FRASER, F.; SCRIMGEOUR, C.; DENNIS, P. G.; MEIER-AUGENSTEIN, W.; GREENFIELD, L. G. Isotopic evidence for the provenance and turnover of organic carbon by soil microorganisms in the Antarctic dry valleys. **Environmental Microbiology**, v. 11, n. 3, p. 597–608, mar. 2009.

HOPKINS, D. W.; SPARROW, A. D.; GREGORICH, E. G.; NOVIS, P.; ELBERLING, B.; GREENFIELD, L. G. Redistributed lacustrine detritus as a spatial subsidy of biological resources for soils in an Antarctic dry valley. **Geoderma**, v. 144, n. 1–2, p. 86–92, 2008.

HOPKINS, D. W.; SPARROW, A. D.; NOVIS, P. M.; GREGORICH, E. G.; ELBERLING, B.; GREENFIELD, L. G. Controls on the distribution of productivity and organic resources in Antarctic Dry Valley soils. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 273, n. 1602, p. 2687–2695, 2006.

HORROCKS, C. A.; NEWSHAM, K. K.; COX, F.; GARNETT, M. H.; ROBINSON, C. H.; DUNGAIT, J. A. J. Predicting climate change impacts on maritime Antarctic soils: a space-for-time substitution study. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 141, n. May 2019, p. 107682, 2020. . Acesso em: 29 mar. 2022.

CHAPIN III, F. S. C.; MCKENDRICK, J. D.; JOHNSON, D. A. Seasonal Changes in Carbon Fractions in Alaskan Tundra Plants of Differing Growth Form: Implications for Herbivory. **The Journal of Ecology**, v. 74, n. 3, p. 707, set. 1986.

INGRAHAM, J. L. (Bedford, 1933). **Growth (Lakeland)**, p. 75–80, 1958.

Instytut Biochemii i Biofizyki PAN. **ASPA 128 Zachodnie Wybrzeże Zatoki Admiralicji (Western Shore of Admiralty Bay)**. Disponível em: <https://arctowski.aq/pl/obszary-chronione/>. Acesso em: 20 de abr. 2023.

JAKOBS, C. L.; REIJMER, C. H.; VAN DEN BROEKE, M. R.; VAN DE BERG, W. J.; VAN WESSEM, J. M. Spatial Variability of the Snowmelt-Albedo Feedback in Antarctica. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 126, n. 2, 1 fev. 2021.

JERRY PULCHAN, K.; HELLEUR, R.; ABRAJANO, T. A. TMAH thermochemolysis characterization of marine sedimentary organic matter in a Newfoundland fjord. **Organic Geochemistry**, v. 34, n. 2, p. 305–317, 2003.

KAAB, A. Remote sensing of permafrost-related problems and hazards. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 136, n. January, p. 107–136, 2008.

KAO-KNIFFIN, J.; WOODCROFT, B. J.; CARVER, S. M.; BOCKHEIM, J. G.; HANDELSMAN, J.; TYSON, G. W.; HINKEL, K. M.; MUELLER, C. W. Archaeal and bacterial communities across a chronosequence of drained lake basins in arctic alaska. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 18165, 18 dez. 2015.

KIM, D.; CHAE, N.; KIM, M.; NAM, S.; KIM, E.; LEE, H. Soil water content as a critical factor for stable bacterial community structure and degradative activity in maritime Antarctic soil. v. 58, n. 12, p. 1010–1017, 2020.

KIM, D.; PARK, H. J.; KIM, J. H.; YOUN, U. J.; YANG, Y. H.; CASANOVA-KATNY, A.; VARGAS, C. M.; VENEGAS, E. Z.; PARK, H.; HONG, S. G. Passive warming effect on soil microbial community and humic substance degradation in maritime Antarctic region. **Journal of Basic Microbiology**, v. 58, n. 6, p. 513–522, jun. 2018.

KIM, D.; PARK, H. J.; KIM, M.; LEE, S.; HONG, S. G.; KIM, E.; LEE, H. Temperature sensitivity of Antarctic soil-humic substance degradation by cold-adapted bacteria. 2021.

KRAUZE, P.; WAGNER, D.; YANG, S.; SPINOLA, D.; KÜHN, P. Influence of prokaryotic microorganisms on initial soil formation along a glacier forefield on King George Island, maritime Antarctica. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 13135, 23 jun. 2021.

KRAUZE, P.; WAGNER, D.; YANG, S., *et al.* "Influence of prokaryotic microorganisms on initial soil formation along a glacier forefield on King George Island, maritime Antarctica", **Scientific Reports**. 11, n. 1, p. 13135, 23 jun. 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-92205-z.

KRINNER, G.; GERMANY, F.; SHONGWE, M.; AFRICA, S.; FRANCE, S. B.; UK, B. B. B. B.; GERMANY, V. B.; UK, O. B.; FRANCE, C. B.; UK, R. C.; CANADA, M. E.; ERICH, M.; UK, R. W. L.; UK, S. L.; LUCAS, C. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. **Climate Change 2013 the Physical Science Basis**:

Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, v. 9781107057, p. 1029–1136, 2013.

KUHLE, M. Elevação isostática glacial do Tibete como consequência de uma antiga camada de gelo. **GeoJournal**, 431-449, 1995.

LA SCALA, N.; DE SÁ MENDONÇA, E.; VANIR DE SOUZA, J.; PANOSSO, A. R.; SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R. Spatial and temporal variability in soil CO₂-C emissions and relation to soil temperature at King George Island, maritime Antarctica. **Polar Science**, v. 4, n. 3, p. 479–487, dez. 2010.

ŁACHACZ, A.; KALISZ, B.; GIEŁWANOWSKA, I.; OLECH, M.; KATARZYNA, J. Nutrient abundance and variability from soils in the coast of king George Island. v. 18, n. 2, p. 294–311, 2018.

LAMBRECHTS, S.; WILLEMS, A.; TAHON, G.; PEARCE, D. A. Uncovering the Uncultivated Majority in Antarctic Soils : Toward a Synergistic Approach. v. 10, n. February, p. 1–19, 2019.

LAND, V.; AISLABIE, J. M.; CHHOUR, K.; SAUL, D. J.; MIYAUCHI, S.; AYTON, J.; PAETZOLD, R. F.; BALKS, M. R. Dominant bacteria in soils of Marble Point and Wright Valley ., v. 38, p. 3041–3056, 2006.

LAWLEY, B.; RIPLEY, S.; BRIDGE, P.; CONVEY, P. Molecular Analysis of Geographic Patterns of Eukaryotic Diversity in Antarctic Soils. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 10, p. 5963–5972, out. 2004.

LEE, K. C.; CARUSO, T.; ARCHER, S. D. J.; GILLMAN, L. N.; LAU, M. C. Y.; CARY, S. C.; LEE, C. K.; POINTING, S. B. Stochastic and Deterministic Effects of a Moisture Gradient on Soil Microbial Communities in the McMurdo Dry Valleys of Antarctica. v. 9, n. November, p. 1–12, 2018.

LEPANE, V.; KÜNNIS-BERES, K.; KAUP, E.; SHARMA, B. Dissolved organic matter, nutrients, and bacteria in Antarctic soil core from Schirmacher Oasis. **Journal of Soils and Sediments**, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11368-018-1913-7>>.

LI, H.; HAN, X.; QIAO, Y.; HOU, X.; XING, B. Carbon dioxide emission from black soil as influenced by land-use change and long-term fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 40, n. 7–8, p. 1350–1368, abr. 2009.

LIU, Z.-H.; YIN, H.; LIN, Z.; DANG, Z. Environmental Technology Reviews Sulfate-reducing bacteria in anaerobic bioprocesses: basic properties of pure isolates, molecular quantification, and controlling strategies. 2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tetr20>>.

LONGTON, R. E. Vegetation ecology and classification in the Antarctic Zone. **Canadian Journal of Botany**, v. 57, n. 20, p. 2264–2278, 1979.

Machado, M. R.; de Oliveira, F. S.; Schaefer, C. E. G.; Francelino, M. R.; Michel, R. F. M. Paisagens polares não glaciais (Proglacial, paraglacial e periglacial): Revisão de conceitos e

contribuições da pesquisa pedogeomorfológica brasileira. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20(3), 2019.

MAIER, R. M.; PEPPER, I. L. Earth Environments. *Em: Environmental Microbiology*. [s.l.] Elsevier, 2009. p. 57–82.

MAKHALANYANE, T. P.; VALVERDE, • Angel; DAVID VELÁZQUEZ, •; EOIN GUNNIGLE, •; VAN GOETHEM, M. W.; QUESADA, A.; COWAN, D. A. Ecology and biogeochemistry of cyanobacteria in soils, permafrost, aquatic and cryptic polar habitats. *Biodivers Conserv*, v. 24, p. 819–840, 2015.

MANCHEN, T. U.; NATURA, R.; BOX, P. O.; THE, S.; KNICKCR, H. Characteristic alterations of quantity and quality of soil organic matter caused by forest fires in continental Mediterranean ecosystems : a solid-state BC NMR study. 2004.

MARDANI, A.; STREIMIKIENE, D.; CAVALLARO, F.; LOGANATHAN, N.; KHOSHNOUDI, M. Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. *Science of The Total Environment*, v. 649, p. 31–49, fev. 2019.

MARFENINA, O. E.; NIKITIN, D. A.; IVANOVA, A. E. The structure of fungal biomass and diversity of cultivated micromycetes in Antarctic soils (progress and Russkaya Stations). *Eurasian Soil Science*, v. 49, n. 8, p. 934–941, 13 ago. 2016.

MARGESIN, R.; LABBÉ, D.; SCHINNER, F.; GREER, C. W.; WHYTE, L. G. Characterization of Hydrocarbon-Degrading Microbial Populations in Contaminated and Pristine Alpine Soils. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 69, n. 6, p. 3085–3092, jun. 2003.

MARIETOU, A. Nitrate reduction in sulfate-reducing bacteria. *FEMS Microbiology Letters*, v. 363, p. 155, 2016. Disponível em:
<<https://academic.oup.com/femsle/article/363/15/fnw155/2197731>>.

MAROSTICA, T. F.; CARGNELUTTI, D.; CAZAROLLI, L. H.; SIQUEIRA, D.; LUZ, V. da. Stomatal conductance and transpiration in *Allium sativum* L. under water deficiency. *COLLOQUIUM AGRARIAE*, v. 18, n. 1, p. 87–95, 6 abr. 2022. Disponível em:
<<https://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view/4136/3403>>.

MASSACCESI, L.; CARTONI MANCINELLI, A.; MATTIOLI, S.; DE FEUDIS, M.; CASTELLINI, C.; DAL BOSCO, A.; MARONGIU, M. L.; AGNELLI, A. Geese Reared in Vineyard: Soil, Grass and Animals Interaction. *Animals*, v. 9, n. 4, p. 179, 19 abr. 2019.

MCCARTHY, Alan J.; WILLIAMS, Stanley T. Actinomycetes as agents of biodegradation in the environment—a review. *Gene*, v. 115, n. 1-2, p. 189-192, 1992.

MCKNIGHT, Diane M. et al. Sorption of dissolved organic carbon by hydrous aluminum and iron oxides occurring at the confluence of Deer Creek with the Snake River, Summit County, Colorado. *Environmental science & technology*, v. 26, n. 7, p. 1388-1396, 1992.

MCMEEKIN, T. A. Polyunsaturated Fatty Acids In Antarctic Bacteria. **Antarctic Science**, v. 5, n. 2, p. 149–160, 1993.

MENDONA, E. D. S.; LA SCALA, N.; PANOSSO, A. R.; SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R. Spatial variability models of CO₂ emissions from soils colonized by grass (*Deschampsia antarctica*) and moss (*Sanionia uncinata*) in Admiralty Bay, King George Island. **Antarctic Science**, v. 23, n. 1, p. 27–33, fev. 2011.

MENDONÇA, T.; MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; MICHEL, R. F. M. Clay Mineralogy of Gelic Soils from the Fildes Peninsula, Maritime Antarctica Soil Mineralogy. 2013. Disponível em: <www.soils.org/publications/sssaj>.

MENGEL, K. **Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops** *Plant and Soil*. [s.l.] KluwerAcademic Publishers, 1996.

MERGELOV, N.; DOLGIKH, A.; SHORKUNOV, I.; ZAZOVSKAYA, E.; SOINA, V.; YAKUSHEV, A.; FEDOROV-DAVYDOV, D.; PRYAKHIN, S.; DOBRYANSKY, A. Hypolithic communities shape soils and organic matter reservoirs in the ice-free landscapes of East Antarctica. **Scientific Reports**, p. 1–19, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-67248-3>>.

MICHEL, R. F. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; DIAS, L. E.; SIMAS, F. N. B.; DE MELO BENITES, V.; DE SÁ MENDONÇA, E. Ornithogenic Gelisols (Cryosols) from Maritime Antarctica. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 4, p. 1370–1376, 2006.

MICHEL, R. F. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; SIMAS, F. N. B.; HAUS, N. W.; SERRANO, E.; BOCKHEIM, J. G. Soils and landforms from Fildes Peninsula and Ardley Island, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, v. 225, n. C, p. 76–86, 2014.

MOLINA-MONTENEGRO, M. A.; RICOTE-MARTÍNEZ, N.; MUÑOZ-RAMÍREZ, C.; GÓMEZ-GONZÁLEZ, S.; TORRES-DÍAZ, C.; SALGADO-LUARTE, C.; GIANOLI, E. Positive interactions between the lichen *Usnea antarctica* (Parmeliaceae) and the native flora in Maritime Antarctica. **Journal of Vegetation Science**, v. 24, n. 3, p. 463–472, maio 2013.

MOORHEAD, D. L.; BARRETT, J. E.; VIRGINIA, R. A.; WALL, D. H.; PORAZINSKA, D. Organic matter and soil biota of upland wetlands in Taylor Valley, Antarctica. **Polar Biology**, v. 26, n. 9, p. 567–576, 2003.

MOORHEAD, D. L.; DORAN, P. T.; FOUNTAIN, A. G.; LYONS, W. B.; MCKNIGHT, D. M.; PRISCU, J. C.; VIRGINIA, R. A.; WALL, D. H. Ecological Legacies: Impacts on Ecosystems of the McMurdo Dry Valleys. **BioScience**, v. 49, n. 12, p. 1009, 1999.

MORITA, R. Y. Psychrophilic Bacteria. v. 39, n. 2, p. 144–167, 1975.

MOURA, P. A. **Solos Criogênicos da Porção Norte da Península Byers, Ilha Livingston, Antártica Marítima: Contribuições ao Monitoramento Ambiental**. [s.l.: s.n.]. Dissertação - mestrado em Ciências, 2010.

- MUSSO, A.; KETTERER, M. E.; GREINWALD, K.; GEITNER, C.; EGLI, M. Rapid decrease of soil erosion rates with soil formation and vegetation development in periglacial areas. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 45, n. 12, p. 2824–2839, 30 set. 2020.
- NANDWA, S. M. Soil organic carbon (SOC) management for sustainable productivity of cropping and agro-forestry systems in Eastern and Southern Africa. p. 143–158, 2001.
- NEWSHAM, K. K. The biology and ecology of the liverwort *Cephaloziella varians* in Antarctica. **Antarctic Science**, v. 22, n. 2, p. 131–143, 24 abr. 2010.
- NEWSHAM, K. K.; GARNETT, M. H.; ROBINSON, C. H.; COX, F. Discrete taxa of saprotrophic fungi respire different ages of carbon from Antarctic soils. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–10, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-25877-9>>.
- NEWSHAM, K. K.; HOPKINS, D. W.; CARVALHAIS, L. C.; FRETWELL, P. T.; RUSHTON, S. P.; O'DONNELL, A. G.; DENNIS, P. G. Relationship between soil fungal diversity and temperature in the maritime Antarctic. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 2, p. 182–186, 28 fev. 2016.
- NICHOLS, C. M.; BOWMAN, J. P.; GUEZENNEC, J. Effects of incubation temperature on growth and production of exopolysaccharides by an antarctic sea ice bacterium grown in batch culture. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 71, n. 7, p. 3519–3523, 2005.
- NICOLAU, Paula Bacelar. **Microrganismos e ambiente: ar e água, solo e extremos**. 2016.
- NIELSEN, U. N.; WALL, D. H. The future of soil invertebrate communities in polar regions : different climate change responses in the Arctic and Antarctic ? p. 409–419, 2013.
- NIEROP, K. G. J.; VAN LAGEN, B.; BUURMAN, P. Composition of plant tissues and soil organic matter in the first stages of a vegetation succession. **Geoderma**, v. 100, n. 1–2, p. 1–24, 2001.
- NOBLE, H. M. Glaciological observations at Admiralty Bay, King George Island, in 1957–58. **British Antarctic Survey Bulletin**, v. 5, p. 1-9, 1965.
- NOTTINGHAM, A. T.; BÅÅTH, E.; REISCHKE, S.; SALINAS, N.; MEIR, P. Adaptation of soil microbial growth to temperature: Using a tropical elevation gradient to predict future changes. **Global Change Biology**, v. 25, n. 3, p. 827–838, 2019.
- ORTIZ, M.; BOSCH, J.; COCLET, C.; JOHNSON, J.; LEBRE, P.; SALAWU-ROTIMI, A.; VIKRAM, S.; MAKHALANYANE, T.; COWAN, D. Microbial Nitrogen Cycling in Antarctic Soils. **Microorganisms**, v. 8, n. 9, p. 1442, 21 set. 2020.
- PASIK, M.; BAKUŁA, K.; RÓŻYCKI, S.; OSTROWSKI, W.; KOWALSKA, M. E.; FIJAŁKOWSKA, A.; RAJNER, M.; ŁAPIŃSKI, S.; SOBOTA, I.; KEJNA, M.; OSIŃSKA-SKOTAK, K. Glacier Geometry Changes in the Western Shore of Admiralty Bay, King George Island over the Last Decades. **Sensors**, v. 21, n. 4, p. 1532, 23 fev. 2021.

PEREIRA, A. B.; FRANCELINO, M. R.; STEFENON, V. M.; SCHÜNEMANN, A. L.; ROESCH, L. F. W. Plant communities from ice-free areas of demay point, King George Island, Antarctica. **INCT-APA Annual Activity Report**, p. 58–62, 2010.

PINGREE, M. R. A.; KARDOL, P.; NILSSON, M.; WARDLE, D. A.; MAAROUFI, N. I.; GUNDALE, M. J. No evidence that conifer biochar impacts soil functioning by serving as microbial refugia in boreal soils. **GCB Bioenergy**, v. 14, n. 8, p. 972–988, 22 ago. 2022.

PIRES, C. V.; SCHAEFER, C. E. R. G.; HASHIGUSHI, A. K.; THOMAZINI, A.; FILHO, E. I. F.; MENDONÇA, E. S. Science of the Total Environment Soil organic carbon and nitrogen pools drive soil C-CO₂ emissions from selected soils in Maritime Antarctica. **Science of the Total Environment**, v. 596–597, p. 124–135, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.144>>.

PLENZLER, Joanna et al. Climatic conditions at Arctowski Station (King George Island, West Antarctica) in 2013–2017 against the background of observed regional changes. **Polish Polar Research**, v. 40, n. 1, p. 1-27, 2019.

POLYAKOV, V.; ABAKUMOV, E. V. Humic Acids Isolated from Selected Soils from the Russian Arctic and Antarctic: Characterization by Two-Dimensional 1H-13C HETCOR and 13C CP/Mas NMR Spectroscopy. **Geosciences**, v. 10, n. 1, p. 15, 30 dez. 2019.

POST, E.; ALLEY, R. B.; CHRISTENSEN, T. R.; MACIAS-FAURIA, M.; FORBES, B. C.; GOOSEFF, M. N.; ILER, A.; KERBY, J. T.; LAIDRE, K. L.; MANN, M. E.; OLOFSSON, J.; STROEVE, J. C.; ULMER, F.; VIRGINIA, R. A.; WANG, M. The polar regions in a 2°C warmer world. **Science Advances**, v. 5, n. 12, 6 dez. 2019.

PRIETZEL, J.; PRATER, I.; COLOCHO HURTARTE, L. C.; HRBÁČEK, F.; KLYSUBUN, W.; MUELLER, C. W. Site conditions and vegetation determine phosphorus and sulfur speciation in soils of Antarctica. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 246, p. 339–362, 2019.

PROESMANS, W.; ANDREWS, C.; GRAY, A.; GRIFFITHS, R.; KEITH, A.; NIELSEN, U. N.; SPURGEON, D.; PYWELL, R.; EMMETT, B.; VANBERGEN, A. J. Long-term cattle grazing shifts the ecological state of forest soils. **Ecology and Evolution**, v. 12, n. 4, 31 abr. 2022.

PUDEŁKO, R.; ANGIEL, P.; POTOCKI, M.; JEDREJEK, A.; KOZAK, M. Fluctuation of Glacial Retreat Rates in the Eastern Part of Warszawa Icefield, King George Island, Antarctica, 1979–2018. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 892, 7 jun. 2018.

RAMPELOTTO, P. H.; BARBOZA, A. D. M.; PEREIRA, A. B.; TRIPLETT, E. W.; SCHAEFER, C. E. G. R.; DE OLIVEIRA CAMARGO, F. A.; ROESCH, L. F. W. Distribution and Interaction Patterns of Bacterial Communities in an Ornithogenic Soil of Seymour Island, Antarctica. **Microbial Ecology**, v. 69, n. 3, p. 684–694, 2015.

RAYMOND, J. A.; FRITSEN, C. H. Semipurification and Ice Recrystallization Inhibition Activity of Ice-Active Substances Associated with Antarctic Photosynthetic Organisms. v. 70, p. 63–70, 2001.

RIVAS-MARTÍNEZ, S.; DEL RÍO, S.; PENAS, Á.; HERRERO, L.; PRIETO, I.; ÁLVAREZ, M.; DÍAZ, T. E.; MOLERO, J.; RIVAS-SÁENZ, S.; CANTÓ, P.; COSTA, M.; SANCHO, L. G. Biogeographical and bioclimatic outline of Antarctica. **Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology**, v. 155, n. 1, p. 5–15, 2 jan. 2021.

ROBBINS, Charles. **Wildlife feeding and nutrition**. Elsevier, 2012.

ROBINSON, S. A.; KING, D. H.; BRAMLEY-ALVES, J.; WATERMAN, M. J.; ASHCROFT, M. B.; WASLEY, J. Rapid change in East Antarctic terrestrial vegetation in response to regional drying. **Nature Climate Change**, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0280-0>>.

ROBINSON, S. A.; WASLEY, J.; TOBIN, A. K. Living on the edge - plants and global change in continental and maritime Antarctica. **Global Change Biology**, v. 9, n. 12, p. 1681–1717, dez. 2003.

RODRIGUES, W. F.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LEITE, M. G. P.; GAUZZI, T.; BOCKHEIM, J. G.; PUTZKE, J. Soil-landscape interplays at Harmony Point, Nelson Island, Maritime Antarctica: Chemistry, mineralogy and classification. **Geomorphology**, v. 336, p. 77–94, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.030>>.

ROSE, J. M.; VORA, N. M.; COUNTWAY, P. D.; GAST, R. J.; CARON, D. A. Effects of temperature on growth rate and gross growth efficiency of an Antarctic bacterivorous protist. **ISME Journal**, v. 3, n. 2, p. 252–260, 2009.

ŠABACKÁ, M.; PRISCU, J. C.; BASAGIC, H. J.; FOUNTAIN, A. G.; WALL, D. H.; VIRGINIA, R. A.; GREENWOOD, M. C. Aeolian flux of biotic and abiotic material in Taylor Valley, Antarctica. **Geomorphology**, v. 155–156, p. 102–111, jun. 2012.

SANDERS, I. R. Preference, specificity and cheating in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Trends in Plant Science**, v. 8, n. 4, p. 143–145, abr. 2003.

SANTOS, J. A. dos; MEYER, E.; SETTE, L. D. Fungal Community in Antarctic Soil Along the Retreating Collins Glacier (Fildes Peninsula, King George Island). **Microorganisms**, v. 8, n. 8, p. 1145, 29 jul. 2020.

SCHEFFERS, B. R.; EDWARDS, D. P.; DIESMOS, A. Microhabitats reduce animal 's exposure to climate extremes. p. 495–503, 2014.

SCHINDLER, D. E.; JANKOWSKI, K.; A'MAR, Z. T.; HOLTGRIEVE, G. W. Two-stage metabolism inferred from diel oxygen dynamics in aquatic ecosystems. **Ecosphere**, v. 8, n. 6, 1 jun. 2017. . Acesso em: 6 mar. 2022.

SCHROETER, B.; GREEN, T. G. A. Summer variability , winter dormancy : lichen activity over 3 years at Botany Bay , 77 ° S latitude , continental Antarctica. p. 13–22, 2011.
SEYBOLD, C. A.; BALKS, M. R.; HARMS, D. S. Characterization of active layer water contents in the McMurdo Sound region , Antarctica. v. 22, n. January 1999, p. 633–645, 2010.

SHADKAMI, F.; HELLEUR, R. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Recent applications in analytical thermochemolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 89, n. 1, p. 2–16, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2010.05.007>>.

SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FILHO, M. R. A.; FRANCELINO, M. R.; FILHO, E. I. F.; DA COSTA, L. M. Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, maritime Antarctica. **Geoderma**, v. 144, n. 1–2, p. 116–122, 2008.

SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C.; MENDONÇA, E.; SILVA, I.; SANTANA, R.; RIBEIRO, A. Organic carbon stocks in permafrost-affected soils from Admiralty Bay, Antarctica. **Antarctica: A keystone in a changing world - Online Proceedings of the 10th ISAES**, n. 56, p. 4, 2007.

SINENSKY, M. Homeoviscous adaptation: a homeostatic process that regulates the viscosity of membrane lipids in *Escherichia coli*. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 71, n. 2, p. 522–525, 1974.

SIQUEIRA, R. G.; MOQUEDACE, C. M.; FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES-FILHO, E. I. Machine Learning Applied for Antarctic Soil Mapping: Spatial Prediction of Soil Texture for Maritime Antarctica and Northern Antarctic Peninsula. **SSRN Electronic Journal**, 2022.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, n. 2, p. 155–176, 2002.

SJÖGERSTEN, S.; WOOKEY, P. A.; SJO, S.; WOOKEY, P. A. The Role of Soil Organic Matter Quality and Physical Environment for Nitrogen Mineralization at the Forest-Tundra Ecotone in Fennoscandia The Role of Soil Organic Matter Quality and Physical Environment for Nitrogen Mineralization at the Forest-Tundra Eco. v. 0430, 2018.

SPINOLA, D. N.; PI-PUIG, T.; SOLLEIRO-REBOLLEDO, E.; EGLI, M.; SUDO, M.; SEDOV, S.; KÜHN, P. Origin of clay minerals in Early Eocene volcanic paleosols on King George Island, Maritime Antarctica. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 6368, 25 jul. 2017.

STOMEIO, F.; MAKHALANYANE, T. P.; VALVERDE, A.; POINTING, S. B.; STEVENS, M. I.; CARY, C. S.; TUFFIN, M. I.; COWAN, D. A. Abiotic factors influence microbial diversity in permanently cold soil horizons of a maritime-associated Antarctic Dry Valley. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 82, n. 2, p. 326–340, 2012.

STRAUSS, S. L.; RUHL, C. T.; DAY, T. A. Trends in soil characteristics along a recently deglaciated foreland on Anvers Island, Antarctic Peninsula. **Polar Biology**, v. 32, n. 12, p. 1779–1788, 2009. . Acesso em: 5 abr. 2022.

SZIŁO, J.; BIALIK, R. Recession and Ice Surface Elevation Changes of Baranowski Glacier and Its Impact on Proglacial Relief (King George Island, West Antarctica). **Geosciences**, v. 8, n. 10, p. 355, 20 set. 2018.

TAHON, G.; TYTGAT, B.; STRAGIER, P.; WILLEMS, A. Analysis of cbbL, nifH, and pufLM in Soils from the Sør Rondane Mountains, Antarctica, Reveals a Large Diversity of Autotrophic and Phototrophic Bacteria. **Microbial Ecology**, v. 71, n. 1, p. 131–149, 1 jan. 2016.

TATUR, A.; MYRCHA, A. Ornithogenic soils on King George Island, South Shetland Islands (Maritime Antarctic Zone). **Polish Polar Research**, v. 5, n. 1–2, p. 31–60, 1984.

TATUR, A.; MYRCHA, A.; NIEGODZISZ, J. Formation of abandoned penguin rookery ecosystems in the maritime Antarctic. **Polar Biology**, v. 17, n. 5, p. 405–417, 1997.

TEARLE, P. V. Cryptogamic carbohydrate release and microbial response during spring freeze-thaw cycles in antarctic fellfield fines. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 4, p. 381–390, 1987.

TECON, R.; OR, D. Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 41, n. 5, p. 599–623, 2017.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. [s.l.: s.n.]v. 3°574 p.

TERAUDS, A.; LEE, J. R. Antarctic biogeography revisited: updating the Antarctic Conservation Biogeographic Regions. 2016. Disponível em: <www.add.scar.org>.

TEWARI, K.; MISHRA, S. K.; SALUNKE, P.; DEWAN, A. Future projections of temperature and precipitation for Antarctica. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac43e2>>.

THOMAZINI, A.; FRANCELINO, M. R.; PEREIRA, A. B.; SCHÜNEMANN, A. L.; MENDONÇA, E. S.; ALMEIDA, P. H. A.; SCHAEFER, C. E. G. R. Geospatial variability of soil CO₂-C exchange in the main terrestrial ecosystems of Keller Peninsula, Maritime Antarctica. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 802–811, 2016a.

THOMAZINI, A.; FRANCELINO, M. R.; PEREIRA, A. B.; SCHÜNEMANN, A. L.; MENDONÇA, E. S.; ALMEIDA, P. H. A.; SCHAEFER, C. E. G. R. Geospatial variability of soil CO₂-C exchange in the main terrestrial ecosystems of Keller Peninsula, Maritime Antarctica. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 802–811, 15 ago. 2016b.

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E. S.; TEIXEIRA, D. B.; ALMEIDA, I. C. C.; LA SCALA, N.; CANELLAS, L. P.; SPOKAS, K. A.; MILORI, D. M. B. P.; TURBAY, C. V. G.; FERNANDES, R. B. A.; SCHAEFER, C. E. G. R. CO₂ and N₂O emissions in a soil chronosequence at a glacier retreat zone in Maritime Antarctica. **Science of the Total Environment**, v. 521–522, p. 336–345, 5 jul. 2015.

THOMAZINI, A.; TEIXEIRA, D. D. B.; TURBAY, C. V. G.; LA SCALA, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MENDONÇA, E. D. S. Spatial Variability of CO₂ Emissions from Newly Exposed Paraglacial Soils at a Glacier Retreat Zone on King George Island, Maritime Antarctica. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 25, n. 4, p. 233–242, 2014.

THORSON, R. M. Resposta glacio-isostática da área de Puget Sound, Washington. *Boletim da Sociedade Geológica da América*, 101(9), 1163-1174, 1989.

TIAO, G.; LEE, C. K.; MCDONALD, I. R.; COWAN, D. A.; CARY, S. C. Rapid microbial response to the presence of an ancient relic in the Antarctic Dry Valleys. *Nature Communications*, v. 3, n. 1, p. 660, 7 fev. 2012.

TOSTES, J. de O. **Solos e paisagens do Setor Oeste da ilha de Deception, Antártica Marítima**. 2011. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2011.

TRUSEL, L. D.; FREY, K. E.; DAS, S. B.; KARNAUSKAS, K. B.; KUIPERS MUNNEKE, P.; VAN MEIJGAARD, E.; VAN DEN BROEKE, M. R. Divergent trajectories of Antarctic surface melt under two twenty-first-century climate scenarios. 2015. Disponível em: <www.nature.com/naturegeoscience>.

WALCOTT, R. I. Movimentos verticais quaternários tardios no leste da América do Norte: Evidência quantitativa de rebote glacio-isostático. *Revisões de Geofísica*, 10(4), 849-884, 1972.

WANG, S.; GUO, X.; WANG, K.; LUO, Z. Influence of the interaction of components on the pyrolysis behavior of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 91, n. 1, p. 183–189, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2011.02.006>>.

WEI, D.; -RI, X.; WANG, Y.; WANG, Y.; LIU, Y.; YAO, T. Responses of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes to livestock enclosure in an alpine steppe on the Tibetan Plateau, China. *Plant and Soil*, v. 359, n. 1–2, p. 45–55, 2012.

WERE, D.; KANSIIME, F.; FETAHI, T.; HEIN, T. Carbon Dioxide and Methane Fluxes from Various Vegetation Communities of a Natural Tropical Freshwater Wetland in Different Seasons. *Environmental Processes*, v. 8, n. 2, p. 553–571, 1 jun. 2021.

WILHELM, K.; BOCKHEIM, J. Influence of soil properties on active layer thermal propagation along the western Antarctic Peninsula. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 41, n. 11, p. 1550–1563, 2016.

WILSON, B. R.; WILSON, S. C.; SINDEL, B.; WILLIAMS, L. K.; HAWKING, K. L.; SHAW, J.; TIGHE, M.; HUA, Q.; KRISTIANSEN, P. Soil properties on sub-Antarctic Macquarie Island: Fundamental indicators of ecosystem function and potential change. *CATENA*, v. 177, p. 167–179, jun. 2019.

WU, J.; YU, S. Effect of root exudates of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mearnsii* on soil microbes under simulated warming climate conditions. *BMC Microbiology*, v. 19, n. 1, p. 224, 15 dez. 2019.

XU, M.; YU, L.; LIANG, K.; VIHMA, T.; BOZKURT, D.; HU, X.; YANG, Q. Dominant role of vertical air flows in the unprecedented warming on the Antarctic Peninsula in February 2020. *Communications Earth & Environment*, v. 2, n. 1, p. 133, 24 jun. 2021.

XU, X.; ZOU, X.; CAO, L.; ZHAMANGULOVA, N.; ZHAO, Y.; TANG, D.; LIU, D. Seasonal and spatial dynamics of greenhouse gas emissions under various vegetation covers in a coastal saline wetland in southeast China. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 469–477, 1 dez. 2014.

YERGEAU, E.; BOKHORST, S.; KANG, S.; ZHOU, J.; GREER, C. W.; AERTS, R.; KOWALCHUK, G. A. Shifts in soil microorganisms in response to warming are consistent across a range of Antarctic environments. **The ISME Journal**, v. 6, n. 3, p. 692–702, 22 mar. 2012.

YERGEAU, E.; NEWSHAM, K. K.; PEARCE, D. A.; KOWALCHUK, G. A. Patterns of bacterial diversity across a range of Antarctic terrestrial habitats. **Environmental Microbiology**, v. 9, n. 11, p. 2670–2682, nov. 2007.

YEOMANS, Jane C.; BREMNER, John Michael. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

YOUNES, K.; GRASSET, L. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Comparison of thermochemolysis and classical chemical degradation and extraction methods for the analysis of carbohydrates, lignin and lipids in a peat bog. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 134, n. May, p. 61–72, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.05.011>>.

YU, X.; YE, S.; OLSSON, L.; WEI, M.; KRAUSS, K. W.; BRIX, H. A 3-Year In-Situ Measurement of CO₂ Efflux in Coastal Wetlands: Understanding Carbon Loss through Ecosystem Respiration and its Partitioning. **Wetlands**, v. 40, n. 3, p. 551–562, 1 jun. 2020.

ZAVARZINA, A. G. et al. Fungal oxidoreductases and humification in forest soils. **Soil enzymology**, p. 207-228, 2011.

ZDANOWSKI, M. K.; ZMUDA, M. J.; ZWOLSKA, I. Bacterial role in the decomposition of marine-derived material (penguin guano) in the terrestrial maritime Antarctic. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 3, p. 581–595, mar. 2005.

ZEGLIN, L. H.; DAHM, C. N.; BARRETT, J. E.; GOOSEFF, M. N.; FITPATRICK, S. K.; TAKACS-VESBACH, C. D. Bacterial Community Structure Along Moisture Gradients in the Parafluvial Sediments of Two Ephemeral Desert Streams. **Microbial Ecology**, v. 61, n. 3, p. 543–556, 9 abr. 2011.

ZHANG, Y.; LU, L.; CHANG, X.; JIANG, F.; GAO, X.; YAO, Y.; LI, C.; CAO, S.; ZHOU, Q.; PENG, F. Small-Scale Soil Microbial Community Heterogeneity Linked to Landform Historical Events on King George Island, Maritime Antarctica. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, 29 mar. 2018.

ZHU, R.; LIU, Y.; MA, E.; SUN, J.; XU, H.; SUN, L. Nutrient compositions and potential greenhouse gas production in penguin guano, ornithogenic soils and seal colony soils in coastal Antarctica. **Antarctic Science**, v. 21, n. 5, p. 427–438, 1 out. 2009.