



Paisagens e processos pedogenéticos em distintos ecossistemas terrestres Antárticos

Landscapes and pedogenetic processes in different Antarctic terrestrial ecosystems

Davi do Vale Lopes*¹ ; Fábio Soares de Oliveira² ; Rafael Gomes Siqueira³ ; José João Leis Leal de Souza³ ; Carlos Ernesto G. R. Schaefer³ ; Marcio Rocha Francelino³

¹Departamento de Geografia, Centro de Ensino Superior do Seridó (CERES), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, Brasil.

²Departamento de Geografia, Instituto de Geociências (IGC), Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil.

³Departamento de Solos, Centro de Ciências Agrárias (CCA), Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil.

E-mail: fabiosolos@gmail.com (FSO); rafael.geo.siqueira@gmail.com (RGS); jjleis@ufv.br (JJLLS); carlos.schaefer@ufv.br (CEGRS); marcio.francelino@ufv.br (MRF).

*Email para correspondência: davivlopes@hotmail.com (DVL)

Recebido (Received): 16/04/2023

Aceito (Accepted): 11/04/2024

Resumo: A Antártica apresenta uma variedade de climas frios que reflete a grande extensão e localização única do seu território. Apesar de avanços recentes, ainda existem muitas lacunas científicas sobre o conhecimento dos solos antárticos. O objetivo deste trabalho é apresentar e discutir os principais processos de formação dos solos nos distintos ecossistemas terrestres da Antártica, definidos a partir de um gradiente latitudinal austral. O estudo foi realizado a partir de revisão de literatura e na experiência acumulada do Núcleo de pesquisas Terrantar (INCT Criosfera), o qual desde 2002 vem atuando de maneira contínua, analisando e monitorando os distintos ecossistemas terrestres antárticos. A classificação dos solos segue os critérios da U.S. Soil Taxonomy e IUSS Working Group WRB. A diversidade de processos pedogenéticos na Antártica implica em uma série de mudanças químicas, físicas e biológicas, em escalas distintas nos ecossistemas terrestres. Onze processos pedogenéticos específicos foram identificados ao longo de um gradiente latitudinal austral: fosfatização, sulfurização, podzolização, rubificação, melanização, paludização, gleização, crioturbação, salinização, deflação e crioclastia. Áreas com sulfurização e fosfatização apresentam maior intemperismo químico e maior desenvolvimento de solos, formando paisagens singulares em meio à dominância de processos de intemperismo físicos (crioclastia, deflação, crioturbação). A melanização é desfavorecida pela vegetação limitada e pouco acúmulo relativo de matéria orgânica em solos da Antártica.

Palavras-chave: Permafrost; Mudanças climáticas; Carbono orgânico; Criosfera.

Abstract: Antarctica has a variety of climates that reflect the vast expanse and unique location of its territory. Despite recent advances, there are still many scientific gaps in our knowledge of Antarctic soils. The objective of this work is to present and discuss the main pedogenetic processes in the different terrestrial ecosystems of Antarctica, defined from an austral latitudinal gradient. The work was developed based on the literature and research experience in Antarctica, where since 2002, the Terrantar Group (INCT Criosfera) has been working incessantly, analyzing, and monitoring the different terrestrial ecosystems. Soils were classified according to the U.S. Soil Taxonomy and IUSS Working Group WRB. The diversity of pedogenetic processes in Antarctica implies a series of chemical, physical and biological changes, at different scales in the terrestrial ecosystem. Eleven pedogenetic processes have been identified along a southern latitudinal gradient: phosphatization, sulfurization, podzolization, rubification, melanization, paludization, gleization, cryoturbation, salinization, deflation and cryoclastic. Areas with sulfurization and phosphatization present greater chemical weathering and greater soil development, forming unique landscapes in midst of the dominance of physical weathering processes (cryoclastic, deflation, cryoturbation). Melanization is disadvantaged by limited vegetation and relatively little accumulation of organic matter in the Antarctic soils.

Keywords: Permafrost; Climate changes; Organic carbon; Cryosphere.

1. Introdução

A Antártica apresenta uma variedade de climas que reflete a grande extensão e localização única do seu território (FRENCH, 2007). A Antártica Continental apresenta condições climáticas extremas, com temperaturas negativas durante todo o ano, nessa região tem-se como características os baixos teores de carbono (< 3 %) (BLUME; SCHNEIDER; BOLTER, 1996), podendo ser inferior a 0,1% em vales secos, como em Victoria Land e Queen Maud Land (CAMPBELL; CLARIDGE 1987; ZAZOVSKAYA *et al.*, 2015). Nessas áreas, tem-se transformações químicas muito incipientes, predominando o intemperismo físico (crioclastia), importante por fornecer material esquelético para os solos (CAMPBELL; CLARIDGE 1987; ZAZOVSKAYA *et al.*, 2015).

A região conhecida como Antártica Marítima, que forma uma zona climática que rodeia o continente abrangendo o Arquipélago Shetlands do Sul e parte da Península Antártica, apresenta clima menos severo, com temperaturas médias positivas durante o verão e maior precipitação em forma líquida (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; SIMAS *et al.*, 2006, 2007). Estas condições permitem um intemperismo químico mais intenso, e o desenvolvimento de solos mais profundos e com maior cobertura vegetal (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; BALKS *et al.*, 2013).

Além do clima mais propício, outro fator que favorece a pedogênese na Antártica é a presença de alguns tipos específicos de materiais de origem (LOPES *et al.*, 2019a; 2019b; 2022b; SIQUEIRA *et al.*, 2021a). Alguns estudos têm mostrado o desenvolvimento de solos de grande profundidade e com elevados teores de partículas finas (silte + argila) na Ilha Rei George (Shetlands do Sul), em áreas onde são expostas rochas enriquecidas em sulfetos, cuja oxidação provoca mudanças significativas na dinâmica geoquímica local (SIMAS *et al.*, 2008; FRANCELINO *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2012; LOPES *et al.*, 2017; 2019b; SIQUEIRA *et al.*, 2021a).

Outro componente fundamental para a formação de solos na Antártica é a considerável atividade da fauna nos ecossistemas costeiros (DAHER *et al.*, 2019; LOPES *et al.*, 2022a), principalmente da avifauna. Estudos anteriores buscaram demonstrar como se desenvolvem os processos de intemperismo químico associados à atividade destes animais, onde o acúmulo de guano é o principal processo responsável pela condução de transformações químicas e mineralógicas nos solos (TATUR; MYRCHA, 1984; CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; TATUR; MYRCHA, 1989; TATUR; MYRCHA; NIEGODZISZ, 1997; MICHEL *et al.*, 2006; SIMAS *et al.*, 2007; SCHAEFER *et al.*, 2017; DAHER *et al.*, 2019; LOPES *et al.*, 2022a; CASTRO *et al.*, 2022).

Apesar dos grandes avanços envolvendo pesquisas pedológicas na Antártica nos últimos anos, ainda existem muitas lacunas científicas sobre o conhecimento dos solos antárticos. Devido às grandes dimensões do continente, a dificuldade de acesso, complexidade climática, litológica e geomorfológica, muitos temas de interesse da Pedologia ainda precisam ser melhor analisados e debatidos. Os próprios sistemas taxonômicos que incluem solos típicos da Antártica, como solos criogênicos (solos afetados por permafrost e/ou crioturbação) precisam ser aprimorados. No caso da U.S. Soil Taxonomy, Bockheim (2015) destaca, por exemplo, a necessidade de reflexões em torno de aspectos como a quantificação da crioturbação, a inclusão de novas subordens em Gelisols, além da determinação de profundidades do permafrost, entre outras.

O objetivo deste trabalho é apresentar e discutir os principais processos de formação dos solos nos distintos ecossistemas terrestres da Antártica, definidos a partir de um gradiente latitudinal austral. Este trabalho preenche uma lacuna na literatura em língua portuguesa, de uma abordagem integradora dos processos pedogenéticos antárticos, os quais são essenciais para o entendimento das dinâmicas ambientais e interpretação das paisagens no âmbito da Criosfera.

Os procedimentos metodológicos deste estudo basearam-se em pesquisa bibliográfica, análises em gabinete e na experiência acumulada de pesquisadores do Núcleo Terrantar, vinculado ao INCT da Criosfera e sediado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), o qual desde 2002 vem atuando de maneira contínua, analisando e monitorando os distintos ecossistemas terrestres antárticos (**Figura 1**). O núcleo Terrantar conta com parceiros em diversas outras instituições do Brasil e do exterior. Utilizaram-se registros fotográficos feitos pelos próprios autores em distintas expedições científicas à Antártica.

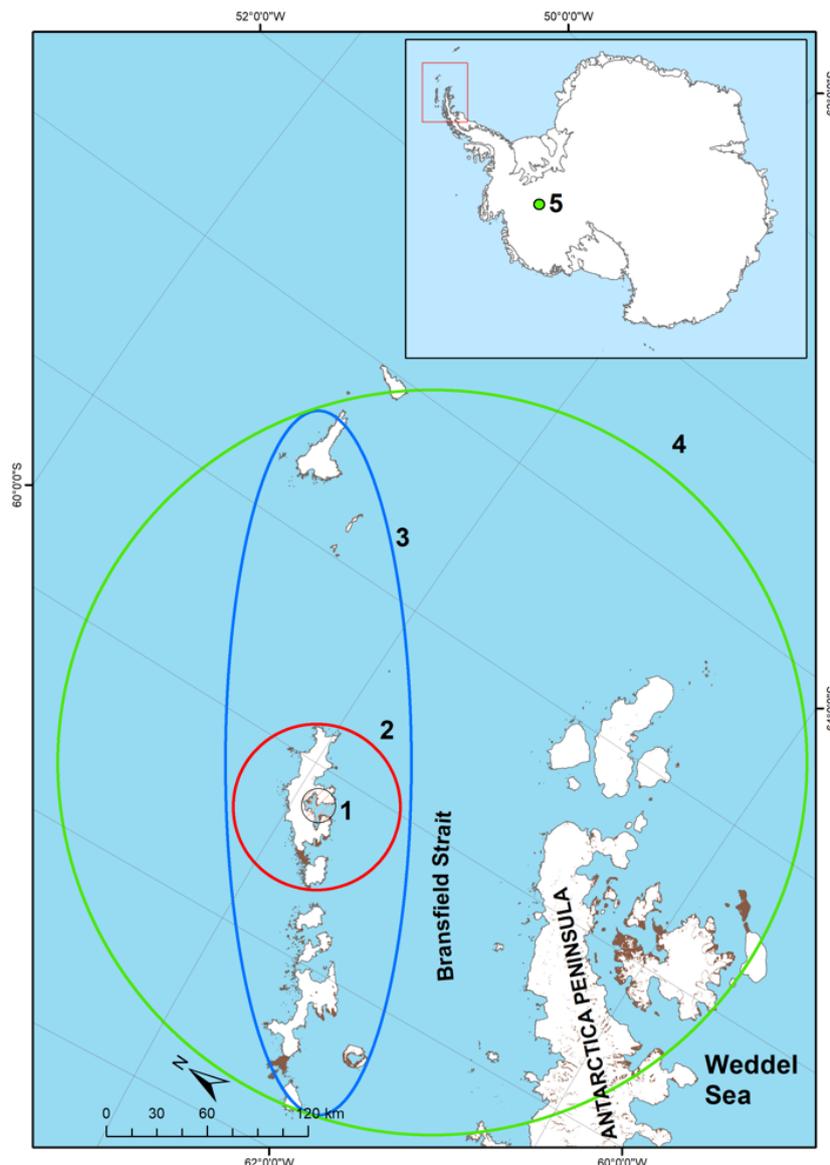


Figura 1: Expansão da área de atuação do Núcleo Terrantar, com o ano de início das pesquisas em cada região da Antártica: 1- área hachurada: Baía do Almirantado (2002); 2- Círculo em vermelho: Ilha Rei George (2006); 3- Linha azul: Arquipélago Shetlands do Sul (2007); 4 – Círculo verde: Península Antártica e ilhas a leste (2009); 5- Ponto verde: Montanhas Ellsworth (2012).

2. Processos pedogenéticos ao longo do gradiente bioclimático austral

As áreas livres de gelo da Antártica têm sido o palco de diversos estudos que buscam compreender como se desenvolvem os processos intempéricos, a gênese dos solos, sua distribuição, interação com processos biológicos, a presença e distribuição de sais, relações com clima, relevo, material de origem, entre outros temas (TATUR; MYRCHA, 1984; CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; UGOLINI, 1990; MICHEL *et al.*, 2006; SIMAS *et al.*, 2007; 2008; SOUZA *et al.*, 2014; HAUS *et al.*, 2015; BLUME; BÖLTER, 2015; BOCKHEIM 2015; SCHAEFER *et al.*, 2017; DAHER *et al.*, 2019; LOPES *et al.*, 2019b; 2022a; 2022b).

Nas paisagens antárticas tem-se diversos processos de formação de solos (superficiais e subsuperficiais), envolvendo adição, transformação, translocação e perda, ocorrendo em distintos ecossistemas terrestres. A Antártica possui várias possibilidades de regionalização. Bockheim e Ugolini (1990) apresentaram um zoneamento do continente utilizando informações de solos e processos pedogenéticos ao longo de um gradiente bioclimático que se prolonga no eixo latitudinal, incluindo ilhas subantárticas, Antártica Marítima e Continental (BOCKHEIM; UGOLINI, 1990). Os processos de rubificação, melanização, podzolização, sulfurização, gleização e paludização diminuem em direção ao sul (**Figura 2**). Os processos de fosfatização e crioturbação são mais comuns na Zona Subantártica e Antártica Marítima, respectivamente (**Figura 2**). Por sua vez, processos de deflação, crioclastia e salinização aumentam em importância relativa ao longo deste gradiente (BOCKHEIM; UGOLINI, 1990; LOPES *et al.*, 2019a) (**Figura 2**).

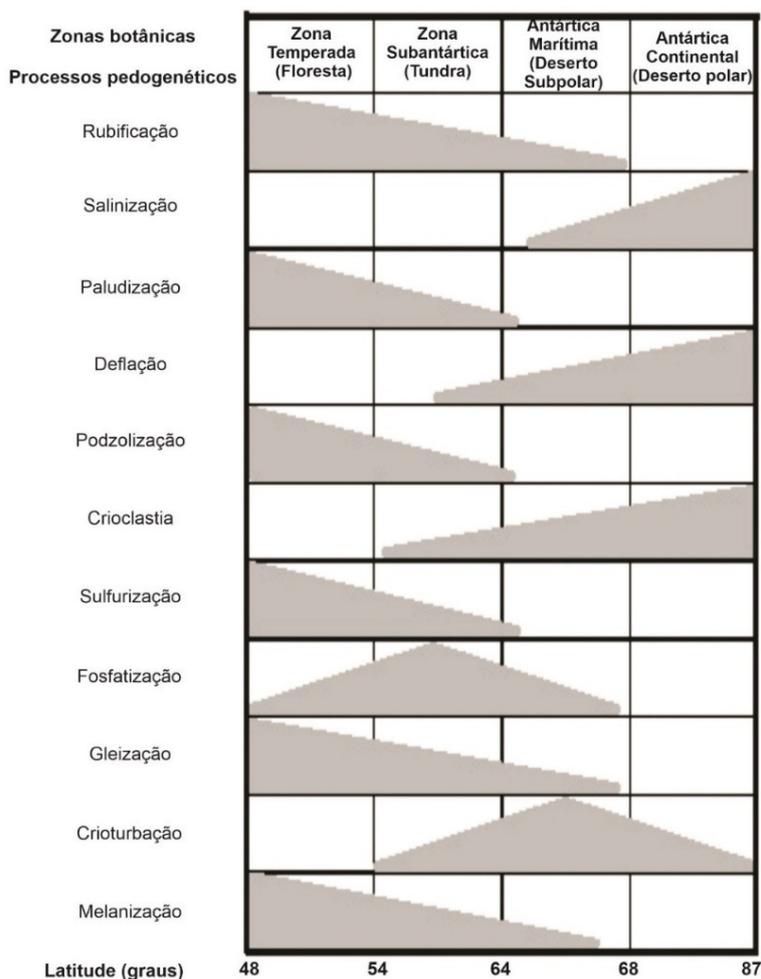


Figura 2: Processos pedogenéticos ao longo de um transecto latitudinal circumpolar no hemisfério sul. Fonte: Adaptado de Bockheim e Ugolini (1990).

3. Ecossistemas terrestres e processos pedogenéticos

Os processos pedogenéticos assim expostos podem ter suas características vinculadas à taxonomia dos solos, como, por exemplo, a U.S. Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2022) e a IUSS Working Group WRB (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022) (**Figura 3**). Essas associações podem levar a uma compreensão ampla das relações entre ecossistemas terrestres antárticos e a pedogênese.

A podzolização é um importante processo pedogenético que envolve translocação de materiais em um solo. De acordo com a U.S. Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2022), o horizonte espódico é uma camada subsuperficial, abaixo de um horizonte O, A, Ap, ou E, maior do que 2,5 cm e com 85% ou mais de material iluvial. No horizonte espódico (*spodos* em grego, significa “cinzas de madeira”) as substâncias iluviais são constituídas por matéria orgânica (**Figura 4C**), Al e/ou Fe (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022; SOIL SURVEY STAFF, 2022). Materiais iluviais são caracterizados por alta carga dependente de pH, relativamente elevada área superficial e alta retenção de água (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022).

A podzolização é marcante na zona subantártica e se torna cada vez mais raro com incremento da latitude (BOCKHEIM; UGOLINI, 1990; BEYER *et al.*, 2000) (**Figura 2**). Foram registrados acúmulo e translocação de matéria orgânica, por exemplo, na Tundra Subantártica e no Deserto Polar, sendo que na primeira, ocorre podzolização em solos arenosos e argilosos (BLUME; SCHNEIDER; BOLTER, 1996). Em solos mais argilosos, a translocação ocorre por crioturbação e em solos arenosos por iluviação. No Deserto Polar, a podzolização ocorre apenas em solos arenosos a cascalhentos, com horizonte E branqueado, pouco espesso (1 a 3 cm) e com horizonte Bh com presença de compostos orgânicos. Somente em áreas de solos ornitogênicos foram observados horizontes E mais espessos (BLUME; SCHNEIDER; BOLTER, 1996).

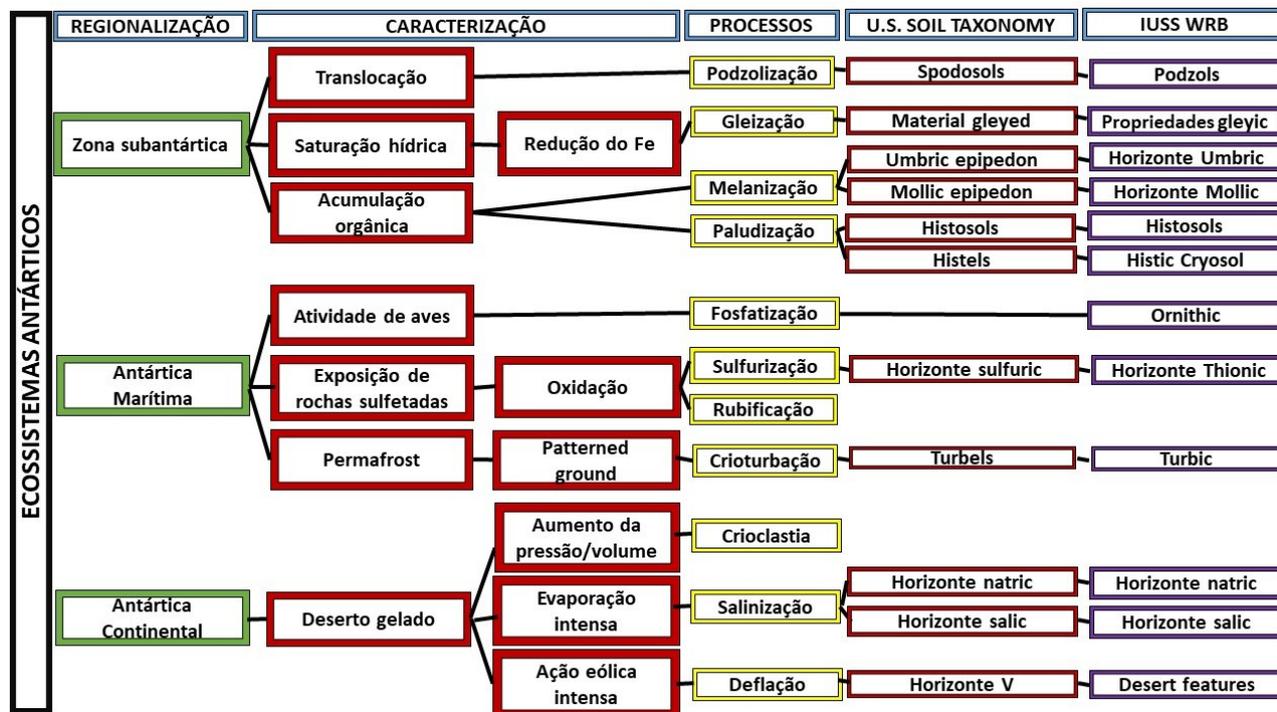


Figura 3: Chave de identificação de processos pedogenéticos em ecossistemas terrestres antárticos e suas implicações nos Sistemas de Classificação de Solos da U.S. Soil Taxonomy e IUSS Working Group WRB.



Figura 4: Exemplos de processos pedogenéticos na Antártica. A – Patterned Ground na Península Barton, Ilha Rei George; B – Crioturbação na Península Barton; C – Podzolização na Península President Head, Ilha Snow; D – Rubificação na Península Barton; E – Paludização na Península President Head; F – Pavimento desértico na Península Barton.

Ambientes com podzolização nas zonas subantártica e antártica são menos ácidos do que as de latitudes mais baixas (BLUME; SCHNEIDER; BOLTER, 1996), quanto maior acidez maior tende a ser a destruição das argilas. A acumulação de matéria orgânica e a podzolização estão associadas (Figura 2) muitas vezes a acidez condicionada pelos próprios ácidos orgânicos que complexam o Fe e Al (MICHEL *et al.*, 2006; PEREIRA *et al.*, 2013).

Na Antártica Marítima, especificamente nas Shetlands do Sul, Simas *et al.* (2015) observaram que a matéria orgânica adicionada pela vegetação pode ser translocada em situações em que o substrato apresenta granulometria mais grosseira, e conseqüente menor capacidade de retê-la. Na Península Antártica, também foi registrada podzolização como um dos processos pedogenéticos ativos, é difícil apresentar a extensão deste processo nessa região, mas é provável que esteja associado à ornitogênese (HAUS *et al.*, 2015).

Nas Ilhas Windmill, também na Antártica Marítima, em ambientes arenosos e cascalhentos com cobertura vegetal, foram registrados processos de podzolização com horizonte E branqueado e pouco encorpado. Somente em solos com teor de cascalho maior que 90%, esses horizontes eram mais espessos (BLUME; BÖLTER, 2015). Na área foi relatada podzolização não somente em pinguineiras abandonadas, mas também em depósitos glaciofluviais. Foram observados solos ligeiramente branqueados (horizonte AE) ou mesmo em estágio mais desenvolvido (horizonte E) com horizonte espódico Bh. Restos orgânicos de líquens e musgos provavelmente estão envolvidas na gênese destes solos, os quais são geralmente formados sob ausência de crioturbação (BLUME; BÖLTER, 2015).

A paludização retrata a acumulação intensa de materiais orgânicos e gênese de horizontes enriquecidos por tais materiais (HAUS *et al.*, 2015). Esse é um importante processo de formação do solo em regiões fora do deserto polar (BEYER *et al.*, 2000). Esse processo é marcante na Antártica pela preservação da matéria orgânica em ambientes frios (associado à menor atividade enzimática) e/ou com saturação hídrica, condição em que ocorre respiração anaeróbica pouco eficiente na mineralização da matéria orgânica, seja pela menor presença de receptores de elétrons que não o O^2 e/ou a baixa eficiência energética deste tipo de mineralização. Na Antártica, existem alguns fatores que favorecem a preservação de compostos orgânicos, como, o clima frio e seco, o qual é crucial para a baixa atividade microbiana e baixa taxa de humificação (formação de substâncias húmicas) (MICHEL *et al.*, 2006; PEREIRA *et al.*, 2013). A presença de componentes amorfos nos solos, os quais possuem alta capacidade de adsorção de ânions, também ajudam a proteger a matéria orgânica contra a degradação microbiana (MICHEL *et al.*, 2006; PEREIRA *et al.*, 2013).

Na Antártica Marítima, a paludização se deve ao acúmulo de musgos (geralmente associações de musgos) (HAUS *et al.*, 2015). Estes solos são classificados como Histels (subordem dos Gelisols) ou Histosols, ordem que representa os solos orgânicos (**Figura 3**) (SOIL SURVEY STAFF, 2022). O acúmulo orgânico e a decomposição operam em maior extensão em ambientes Temperados Frios e em Zonas Subantárticas, com declínio na Antártica Marítima, sendo insignificante na Antártica Continental (BOCKHEIM; UGOLINI, 1990).

A melanização é um processo de escurecimento do solo e formação de um horizonte relativamente profundo marcado pela incorporação de matéria orgânica (BOCKHEIM; UGOLINI, 1990; HAUS *et al.*, 2015). Este processo foi registrado na Península Antártica (HAUS *et al.*, 2015) e na Ilha Rei George, Antártica Marítima (SIMAS *et al.*, 2015). Em áreas com longo tempo de colonização de aves, os solos com melanização apresentam estrutura mais desenvolvida e diferenciação de horizontes mais clara que em solos não ornitogênicos (SIMAS *et al.*, 2015). Com base na coloração escura e presença de compostos orgânicos em horizontes superficiais, a melanização ocorre na Antártica Marítima, mas o aporte orgânico decresce em direção ao polo sul. Na Antártica Oriental e Montanhas Transantárticas este processo não ocorre (BOCKHEIM; UGOLINI, 1990). A melanização está associada, principalmente, à epipedons umbric ($V > 50\%$) ou mollic ($V > 50\%$) (**Figura 3**) (SOIL SURVEY STAFF, 2022). A identificação desses horizontes em campo pode ser feita através da observação da cor escura (sendo horizontes minerais, $< 20\%$ de C) e pela sua estrutura, o horizonte umbric tende a ter um grau menor de estrutura do que o horizonte mollic (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022). A maioria dos horizontes umbrics tem uma reação ácida (pH em água $< 5,5$), o que indica distrofismo, podendo ser observado em campo pelo crescimento radicular raso e horizontal na ausência de barreiras físicas (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022).

A gleização (hidromorfia) refere-se a processos de redução do Fe férrico a Fe ferroso sob condições anaeróbicas (HAUS *et al.*, 2015). Este processo foi identificado na Península Antártica, embora as características redoximórficas não estejam muito bem expressas nos solos (HAUS *et al.*, 2015). Nos Arquipélagos das Orcadas do Sul e Shetland do Sul, a abundância de solos classificados como Aquiturbels (SOIL SURVEY STAFF, 2022), reflete o efeito do permafrost na drenagem e no processo de hidromorfia (SIMAS *et al.*, 2015). Normalmente, áreas com tapetes de musgos indicam condições de saturação, como observado por Rodrigues *et al.* (2019), em Harmony Point, Ilha Nelson, enquanto espécies de plantas superiores indicam ambientes bem drenados (HAUS *et al.*, 2015). Ambientes de praias e terraços marinhos são favoráveis à existência da gleização por apresentarem extensas áreas encharcadas (SIMAS *et al.*, 2015).

A rubificação é um processo com importante implicação paisagística pela mudança de cores que se destacam na paisagem (**Figura 4D**). Segundo Navarro *et al.* (2011), no processo de rubificação o

intemperismo químico promove a liberação de Fe dos minerais primários, o que leva a uma mudança de coloração do solo para avermelhado, amarelado ou amarronzado. Na Antártica, os processos de rubificação diminuem em direção ao polo sul (BOCKHEIM; UGOLINI, 1990). De acordo com Bockheim et al (2015), a rubificação está entre os processos predominantes de formação do solo nas Montanhas Transantárticas, junto com a salinização, deflação (essencial para gênese dos pavimentos desérticos) e o desenvolvimento do permafrost. Existem correlações positivas entre as propriedades físicas e químicas específicas do material original alterado e as idades das superfícies (MARKEWICH *et al.*, 1989). Essas associações baseiam-se nas propriedades diagnósticas de perfis de solo, como a profundidade de oxidação, a porcentagem de minerais primários facilmente alteráveis, a espessura do *solum*, massa de argila, mineralogia, rubificação e a geoquímica (MARKEWICH *et al.*, 1989). A profundidade de oxidação, a espessura do *solum* e a quantidade de óxidos aumentam com a idade do relevo e a porcentagem de minerais lábeis diminuem com a idade e aumenta com a profundidade da superfície. Na Antártica Continental, em ambientes extremamente secos a rubificação é um indicador de idades muito antigas. Por sua vez, na Antártica Marítima, essas associações com o fator tempo são mais limitadas, em razão das condições climáticas que também influenciam no processo de oxidação (**Figura 4D**).

A crioturbação se refere à migração mecânica de partículas finas no solo relacionada aos ciclos anuais de congelamento e descongelamento na camada ativa (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987). É um requisito para gênese dos Turbels (solos crioturbadados com permafrost dentro de 2m de profundidade) (SOIL SURVEY STAFF, 2022). Ocorre em diversas áreas da Antártica, sendo que nas Ilhas Windmill foi registrado permafrost contínuo, patterned-ground e crioturbação como processo predominante, em destaque para áreas ausentes de vegetação (BLUME; BÖLTER, 2015). De acordo com Campbell e Claridge (1987), a crioturbação é um limitante para o crescimento da vegetação devido a instabilidade da superfície do solo.

A crioturbação é, na maioria dos solos, evidenciada por cunhas de gelo, involução de partículas, transições entre horizontes onduladas e irregulares, distribuição errática de argila e silte ao longo do perfil, segregação de partículas, entre outros (HAUS. *et al.*, 2015). Na Antártica, solos com baixo teor argila e silte, como Spodorthels, não demonstraram feições de crioturbação devido ao baixo teor de umidade na camada ativa (BLUME; BÖLTER, 2015), o mesmo foi reportado por Siqueira *et al.* (2021b) em Psammorthels na Ilha Vega (Arquipélago James Ross). Nas Shetlands do Sul, a crioturbação é um fenômeno generalizado resultando na intensa crioclastia, superfícies com padrão e gelifluxão (SIMAS *et al.*, 2015; LOPES *et al.*, 2019a; SIQUEIRA *et al.*, 2021b). Na Antártica Marítima, a crioturbação em conjunto com outros processos como, a crioclastia, a presença de permafrost e de *patterned ground*, são relevantes para identificar condições de periglacialismo, sendo esses de ocorrência generalizada dentro de um limite altitudinal, acima de 10 m de altitude a.n.m., sendo especialmente ativos em plataformas entre 30 e 100 m a.n.m. (LOPEZ-MARTINEZ *et al.*, 2012).

4. “O Éden Antártico”: fosfatização como processo de formação de solos

Material ornitogênico (do grego *ornithos* = aves e *genesis* = origem) é um material com forte influência de excrementos de aves, frequentemente com alto teor de cascalho transportados pelas aves e identificado por outros indícios, como ossos, cascas de ovos e penas (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022). Áreas com solos ornitogênicos constituem o local mais importante de sequestro de carbono na Antártica (SIMAS *et al.*, 2007).

O avanço do intemperismo químico em áreas ornitogênicas tem sido reportado por diversos autores (TATUR; MYRCHA, 1984; 1989; TATUR; MYRCHA; NIEGODZISZ, 1997; MICHEL *et al.*, 2006; SIMAS *et al.*, 2007; SIMAS *et al.*, 2015; SCHAEFER *et al.*, 2017; LOPES *et al.*, 2022; CASTRO *et al.*, 2022). Isso ocorre a partir das reações químicas promovidas pela decomposição da matéria orgânica proveniente do excremento das aves depositado sobre diferentes substratos (rochas, sedimentos e/ou solos). A atividade de aves, durante o curto verão antártico promove a transferência de nutrientes e matéria orgânica entre os sistemas oceânico e terrestre (OTERO *et al.*, 2018; QIN *et al.*, 2014; LOPES *et al.*, 2022a), originando os solos ornitogênicos.

De acordo com Otero *et al.* (2018), estima-se que as quantidades mundiais de nitrogênio total (N) e fósforo (P) excretado por aves marinhas chegam a 591 Gg por ano de N e 99 Gg por ano de P (1 Gigagrama = 1000 toneladas), destacando-se os valores mais elevados na região costeira da Antártica, onde os valores chegam a 470 Gg de N e 79 Gg de P por ano (OTERO *et al.*, 2018). A fosfatização conduz ao favorecimento do crescimento da vegetação (**Figuras 5A, 5B e 5D**), aumento do teor de C orgânico no solo, formação de estruturas granular e sub-arredondadas, e mobilização de fosfatos (iluviação) com neoformação de minerais (SIMAS *et al.*, 2007).

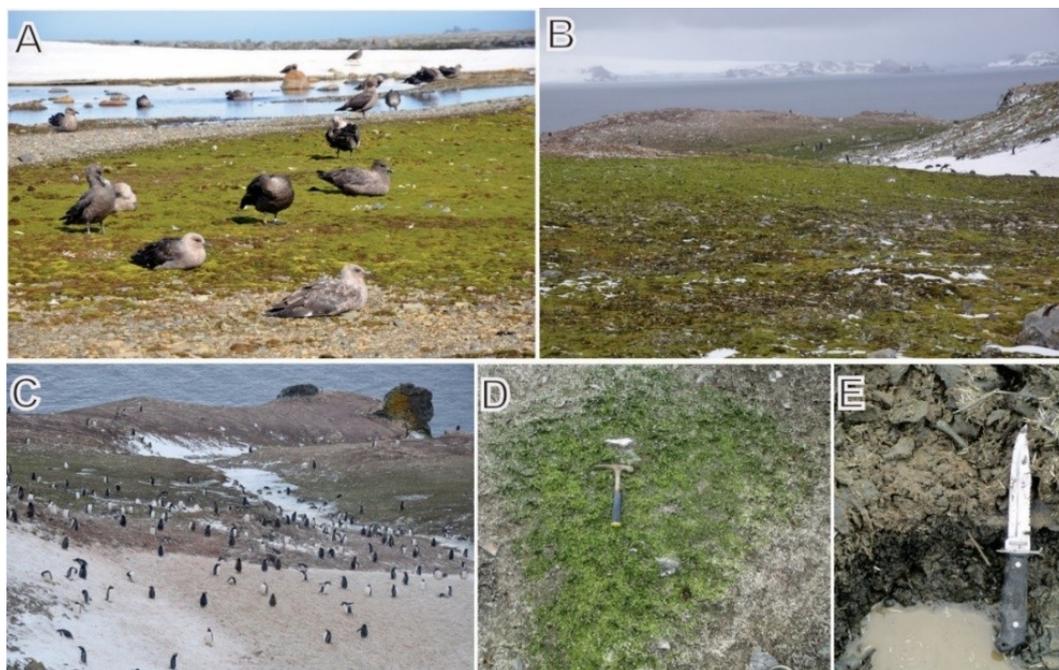


Figura 5: Solos ornitogênicos e fosfatização na Antártica. A – Skuas em um terraço marinho vegetado na Península Barton, Ilha Rei George; B – Pinguineira bem vegetada na Península Barton; C – Pinguineira ativa na Península Barton; D – Área de fosfatização na Ilha Snow com presença de ossos, penas, cascas de ovos e cascalhos; E – Solo ornitogênico, com presença de penas, ovos, conchas e água minando na base do perfil na Ilha Snow.

Solos ornitogênicos da Antártica Marítima (**Figura 5E**) são diferentes do Continente (TATUR; MYRCHA, 1984). Em ambiente úmido, as substâncias lavadas da decomposição do guano reagem com o substrato formando uma vasta zona de fosfatização (TATUR; MYRCHA, 1984). Estas condições favorecem a formação de solos mais profundos e com mais partículas finas (silte + argila). De acordo com Michel *et al.* (2006), níveis mais altos de P e umidade suficiente para promover a percolação da solução lixiviada, parece ser um determinante importante para cobertura vegetal contínua em área de fosfatização. Os ambientes com solos ornitogênicos correspondem a oásis para ocupação da vegetação e são extremamente importantes pela oferta de nutrientes para os ecossistemas terrestres e marinhos antárticos (MICHEL *et al.*, 2006; SIMAS *et al.*, 2007; OTERO *et al.*, 2018; LOPES *et al.*, 2022a).

5. Sulfurização como processo pedogenético: “catalizador da pedogênese antártica”

O intemperismo químico é limitado pelo clima na Antártica (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; LOPES *et al.*, 2019a; 2019b; SIQUEIRA *et al.*, 2021a), mas a presença de alguns materiais de origem pode mudar essa situação. Esse é o caso das rochas ricas em sulfetos, as quais estão diretamente associadas ao processo de sulfurização, formando os solos ácidos sulfatados (SIMAS *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2012; LOPES *et al.*, 2017; 2019b; SIQUEIRA *et al.*, 2021a).

Os solos ácidos sulfatados são tidos como um problema ambiental que atinge várias partes do planeta, onde se desenvolvem como resultado da drenagem de materiais de origem ricos em sulfetos de ferro (DENT, 1986). Os sulfetos de ferro se acumulam em ambientes hidromórficos ricos em matéria orgânica, geralmente relacionado a águas marinhas. Quando estes ambientes são drenados, esses sulfetos são oxidados e se forma o ácido sulfúrico. A oxidação química dos sulfetos é lenta, mas a reação mediada por bactérias catalisadoras, em particular, *Thiobacillus ferrooxidans*, são significativas, pois ambos compartilham das condições ótimas para a oxidação (DENT, 1986).

A quantidade potencial de geração de acidez depende da quantidade total, dos tipos e tamanhos dos sulfetos, temperatura, entre outros. A desestabilização de minerais silicatados, por exemplo, os minerais primários facilmente intemperizáveis, como os ferro-magnesianos, podem contribuir para neutralização da acidez. Outras importantes fontes consumidoras de acidez são sais e carbonatos, estes últimos possuem maior poder de neutralização (BIGHAM; NORDSTROM, 2000).

Os solos ácido sulfatados, desenvolvem-se onde a produção de acidez excede a capacidade de neutralização, com o pH ficando inferior a 4 (DENT, 1986). Horizonte sulfúrico é composto de material

mineral ou orgânico que tem um valor de pH menor ou igual a 3,5 ou inferior a 4,0, se houver sulfetos ou outros minerais contendo S que produzam ácido sulfúrico após a oxidação (SOIL SURVEY STAFF, 2022). Estas condições são prejudiciais para maioria das plantas. O estresse fisiológico é atribuído principalmente à toxicidade por Al e às deficiências nutricionais, especialmente fósforo (DENT, 1986).

Alguns tipos de sulfeto são: pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), arsenopirita (FeAsS), marcassita (FeS_2), entre outros. O sulfeto mais comumente encontrado é a pirita. Com sua oxidação, é liberado Fe (II) e oxidado a Fe (III). Dependendo das condições geoquímicas, o ferro férrico pode hidrolisar e precipitar em formas oxidadas, tais como a ferridrita e schwertmannita, os quais ainda poderão se converter em formas mais estáveis como a goethita (DOLD *et al.*, 2013).

Em ambientes periglaciais, o processo de gênese dos solos sulfatados está relacionado à exposição de rochas ricas em sulfetos e às condições atmosféricas, modificando as condições geoquímicas (**Figura 6D**) (LOPES *et al.*, 2019b; SIQUEIRA *et al.*, 2021a). Desta forma, tanto os solos quanto a qualidade das águas de drenagem podem ser influenciados pela presença de sulfetos (**Figura 6C**) (SOUZA *et al.*, 2012; LOPES *et al.*, 2019b). Dent (1986) destaca que o ácido sulfúrico gerado acarreta a maior mobilidade de Al e metais pesados. A mudança de sulfeto para sulfato acarreta em aumento do Eh, geração de acidez, formação de minerais sulfatados, entre outros (KRAUSKOPF, 1979; SOUZA *et al.*, 2012).

Simas *et al.* (2006) registraram, nas áreas de solos afetados por sulfetos na Península Keller, a presença de minerais secundários de carga permanente (illita, esmectita, clorita) e de caráter anfotérico (jarosita e ferridrita). Dent (1986) relata que a jarosita é comumente encontrada em solos ácidos, imprimindo a sua coloração típica amarela (**Figura 6B**). Seu revestimento se dá em torno de poros em condições ácidas fortemente oxidantes (Eh maior que 400 mV, pH inferior a 3,7). A jarosita pode apresentar certas variedades, mas a forma de potássio predomina (DENT, 1986).

Além de propiciar maior desenvolvimento dos solos, a oxidação de minerais sulfetados é importante fonte de nutrientes e também metais pesados (SIMAS *et al.*, 2006; SOUZA *et al.*, 2012). Na Ilha Seymour, Souza *et al.* (2014) registraram que os solos ácidos sulfatados são os mais desenvolvidos da área. Na Ilha Rei George, nas Penínsulas Barton e Keller, respectivamente, Lopes *et al.* (2017; 2019b) e Simas *et al.* (2008) relataram presença de solos ácidos, horizontes sulfúricos, minerais de argila que indicam intemperismo químico mais avançado e desestabilização de minerais primários em áreas de oxidação de sulfetos. Áreas sulfetadas possuem características muito peculiares (SOUZA *et al.*, 2012; LOPES *et al.*, 2019b; SIQUEIRA *et al.*, 2021a) e não podem ser tratadas como as demais. Assim, locais com oxidação de sulfetos formam ambiente com pedogênese agressiva, completamente distinta de áreas não sulfetadas.



Figura 6: Solos sulfatados e sulfurização na Península Barton, Ilha Rei George, Antártica. A – Paisagem com ocorrência de oxidação de sulfeto; B – Perfil de solo sulfatado; C – Canais de drenagem e águas ácidas; D - Andesito piritizado com marcas de oxidação; E – Solo sulfatado.

Siqueira *et al.* (2021a) referem que os solos sulfatados na Antártica possuem sua gênese fortemente ligada ao material de origem (**Figura 6D**), embora existam propriedades que podem ser interpretadas de acordo com o gradiente climático. Na região da Antártica Marítima (clima menos severo) têm-se combinação da sulfurização com fosfatização e acúmulo orgânico. Por sua vez, em James Ross (clima mais seco), têm-se combinação com a salinização (SIQUEIRA *et al.*, 2021a). Dessa forma, a Antártica apresenta uma pedogênese complexa, dependendo não somente das características do material original, mas também nas condições climáticas.

6. Principais processos pedogenéticos associados às condições climáticas extremas

Os ecossistemas polares se desenvolvem em condições de energia restrita impostas pela alta latitude, porém, mesmo nessas condições climáticas extremas, a literatura confirma a ocorrência de processos pedogenéticos e a formação de solos (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; BOCKHEIM; UGOLINI, 1990; BEYER *et al.*, 2000; BLUME; BÖLTER, 2015; BOCKHEIM *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2017). Estes ambientes são marcados principalmente pela ocorrência de processos como salinização, deflação e crioclastia.

A salinização compreende processo de acúmulo de sais solúveis no solo. Considerando o gradiente climático do hemisfério sul, englobando a região Temperada, Subantártica, Antártica Marítima e Antártica Continental, observa-se aumento da atuação de processos de salinização (BOCKHEIM, 2015). Durante os processos de intemperismo, íons são liberados em ambientes de clima árido (baixa lixiviação), e permanecem no solo como acumulações de sais ou incrustações nas rochas (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; LOPES *et al.*, 2019a).

A presença de sais solúveis na solução do solo é essencial para atuação de processos de haloclastia, bem como de intemperismo químico, os quais são dependentes de umidade, mesmo em áreas muito frias (como na Antártica Continental). Soluções com concentrações elevadas de sais podem permanecer descongeladas e favorecer a alteração do substrato (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987). Na Antártica, a acumulação dos sais no solo pode dar-se de diferentes maneiras. Na Antártica Continental ocorre maior precipitação superficial em razão das condições climáticas extremas, com evaporação intensa. Por sua vez, na Antártica Marítima, os solos são afetados principalmente pelo spray salino. Em ambos os casos ocorrem alterações nas propriedades físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas dos solos em diferentes graus.

Souza *et al.* (2014) identificaram na Ilha Seymour, Mar de Weddell, área de transição climática entre a Antártica Marítima e a Continental, que os solos apresentam poucos sinais de crioturbação e são predominantemente afetados pela salinização com presença de horizontes nátricos e sálicos (**Figura 3**). O horizonte natric é marcado por ter material iluvial em subsuperfície, com teores significativamente maiores de argila que os horizontes subjacentes, resultante das propriedades dispersivas do sódio, o pH destes horizontes normalmente é maior ou igual a 8,5 (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022; SOIL SURVEY STAFF, 2022). Por sua vez, o horizonte sálico pode ser superficial ou subsuperficial, marcado pelos teores elevados de sais facilmente solúveis (isto é, mais solúveis que a gipsita $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), produtos de evaporações intensas em ambientes áridos e semiáridos (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022; SOIL SURVEY STAFF, 2022).

A crioclastia, processo de fragmentação mecânica associada ao congelamento é considerada o processo de intemperismo mais importante na Antártica (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; FRENCH, 2007). A expansão da água ao congelar promove aumento de pressão e conseqüentemente a quebra mecânica das rochas, gerando clastos angulares ou a sua desintegração granular (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987). A crioclastia também influencia na formação de uma vasta gama de formas de relevo na Antártica (LOPEZ-MARTINEZ *et al.*, 2012). Lopes *et al.* (2022b), identificaram na Ilha Snow, Antártica Marítima, diferenças marcantes entre os efeitos da crioclastia entre os domínios sedimentares e ígneos. No domínio sedimentar, associado a rochas menos resistentes à fragmentação mecânica, o intemperismo físico atua de maneira acelerada, formando pavimentos pedregosos e encostas de tálus (LOPES *et al.*, 2022b). Foi identificado que a maior porosidade, a xistosidade, a variação composicional dos estratos e os grãos minerais de menor tamanho potencializam os efeitos crioclasticos (LOPES *et al.*, 2022b).

A intensa fragmentação mecânica aliada a deflação são processos essenciais para a gênese dos pavimentos desérticos (**Figura 4F**), sendo uma feição de ocorrência singular e, ao contrário do que parece, de grande interesse pedológico (SOUZA *et al.*, 2017; LOPES *et al.*, 2019a). Refere-se a uma superfície em que se tem presença marcante de cascalhos e fragmentos mais grossos envernizados, típicos de ambientes desérticos e semidesérticos, com incipiente atuação de processos químicos (CAMPBELL; CLARIDGE,

1987; BOCKHEIM; UGOLINI, 1990). Em áreas com ocorrência destes pavimentos, principalmente em localidades com ausência de vegetação, ocorrem intensa ação eólica, remoção de partículas finas (areia, silte e argila) e concentração de clastos, dando gênese a uma superfície mais resistente em relação aos processos erosivos (SIQUEIRA *et al.*, 2021b).

Na literatura não existem referências que mencionem estes pavimentos em ambientes temperados austrais ou em regiões subantárticas, sendo mais comuns na Antártica Continental (BOCKHEIM; UGOLINI, 1990) e algumas regiões circunvizinhas. Siqueira *et al.* (2021b) identificaram pavimentos desérticos na Ilha Vega (região do Mar de Weddell), caracterizada por ter um clima semiárido, na transição entre a Antártica Marítima (mais quente e úmida) e a Antártica Continental (mais seca e fria). Na Antártica Marítima, são encontradas superfícies semelhantes, mas que talvez, seja melhor utilizar o termo “pavimentos pedregosos”, pois apresentam distinções, principalmente em relação ao intemperismo químico mais significativo, observado por apresentar mais partículas finas (silte + argila).

Os pavimentos desérticos podem se formar muito rapidamente, podendo estar presente em superfícies mais jovens. Quanto mais antigo for o pavimento desértico, mais polidos e envernizados serão os fragmentos de rocha residuais. Normalmente, em superfície, o pavimento é constituído apenas de rochas mais resistentes, o que não ocorre em profundidade (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987). Essas feições ainda podem influenciar à dinâmica térmica do solo, pois, modificam o albedo superficial.

7. Conclusões

As diversidades de processos pedogenéticos nos ecossistemas terrestres antárticos implicam em uma série de mudanças paisagísticas, químicas, físicas e biológicas para os ambientes em que se inserem.

Onze processos pedogenéticos foram analisados ao longo de um gradiente latitudinal antártico: fosfatização, sulfurização, rubificação, podzolização, melanização, paludização, gleização, crioturbação, salinização, deflação e crioclastia.

Áreas com sulfurização e fosfatização apresentam maior intemperismo químico e maior desenvolvimento de solos nos ecossistemas antárticos. Ambientes com atuação destes processos apresentam solos singulares, podendo estes dados subsidiar as políticas de preservação ambiental da Antártica.

Existem muitos estudos de processos pedogenéticos em ambientes tropicais e temperados, mas ainda são escassos em regiões polares e subpolares. Estudos com técnicas refinadas, como micromorfologia e microquímica, podem auxiliar com novas informações sobre gênese e sistemas de transformações pedológicas em ambientes com solos desenvolvidos em condições climáticas extremas. Novas abordagens com técnicas de datações são essenciais para aprimorar o entendimento das paisagens e compreender a sua evolução.

Referências

- BEYER, L.; PINGPANK, K.; WRIEDT, G.; BÖLTER, M. Soil formation in coastal continental Antarctica (Wilkes Land). *Geoderma* 95: 283-304, 2000.
- BIGHAM, J. M.; NORDSTROM, D. K. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. In: ALPERS, C. N.; JAMBOR, J. L.; NORDSTROM, D. K. (Org.). **Sulfate Minerals – Crystallography, Geochemistry, and Environmental Significance**. Washington, DC: Mineral. Soc. Amer. 40, p. 351–403, 2000.
- BLUME, H.-P.; BÖLTER, M. Soils of Wilkes Land (The Windmill Islands). In: BOCKHEIM, J.G. (Org.). **The soils of Antarctica**. 1. ed. Switzerland: Springer International Publishing, p. 87–105, 2015.
- BLUME, H.; SCHNEIDER, D.; BOLTER, M. Organic Matter Accumulation in and Podzolization of Antarctic Soils. *Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde* (Germany), 159. p. 411-412, 1996.
- BOCKHEIM, J.G. Soil-Forming Factors in Antarctica. In: BOCKHEIM, J.G. (Org.). **The soils of Antarctica**. 1. ed. Switzerland: Springer International Publishing, p. 5–20, 2015.
- BOCKHEIM, J. G.; UGOLINI, F. C. A review of pedogenic zonation in well-drained soils of the Southern Circumpolar Region. *Quaternary Research*, v. 34, n. 1, p. 47–66, 1990.

- BOCKHEIM, J.; LUPACHEV, A.; BLUME, H.-P.; BÖLTER, M.; SIMAS, F.; MCLEOD, M. Distribution of soil taxa in Antarctica: a preliminary analysis. *Geoderma*, 245–246, p. 104–111, 2015. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.01.017
- CAMPBELL, I. B.; CLARIDGE, G. G. C. **Antarctica: soils, weathering processes and environment**. Amsterdam: Elsevier, 1987. 407p.
- CASTRO, M. F.; MEIER, M.; NEVES, J. C. L.; FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; OLIVEIRA, T. S. Influence of different seabird species on trace metals content in Antarctic soils. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 94, p. e20210623, 2022.
- DAHER, M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; THOMAZINI, A.; NETO, E.L.; SOUZA, C.D.; LOPES, D.V., Ornithogenic soils on basalts from maritime Antarctica. *Catena*, v. 173, n. March 2018, p. 367–374, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.028>.
- DENT, D. **Acid sulphate soils: a baseline for research and development**. ILRI Publications, 1986. 204p.
- DOLD, B.; AGUILERA, A.; CISTERNAS, M.E.; BUCCHI, F.; AMILS, R. Sources for Iron Cycling in the Southern Ocean. *Environmental science & technology*, v. 47, p. 6129–6136, 2013.
- FRANCELINO, M.R.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SIMAS, F.N.B.; FILHO, E.I.F.; SOUZA, J.J.L.L.; COSTA, L.M., Geomorphology and soils distribution under paraglacial conditions in an ice-free area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Catena*, v. 85, n. 3, p. 194–204, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.007>
- FRENCH, H. M. **The Periglacial Environment**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2007. 479p.
- HAUS, N.W.; WILHELM, K.R.; BOCKHEIM, J.G.; FOURNELLE, J.; MILLER, M. Soils of Graham and Palmer Lands, Antarctic Peninsula. In: BOCKHEIM, J.G. (Org.). **The soils of Antarctica**. Switzerland: Springer International Publishing, p. 205–225, 2015.
- IUSS Working Group WRB. **World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 234p.
- KRAUSKOPF, K. B. **Introduction to geochemistry**, 2nd edn., McGrawHill, New York, 1979. 617p.
- LOPES, D.V, SOUZA, J.J.L.L.; OLIVEIRA, F.S.; SCHAEFER, C.E.G.R. Solos e Evolução da Paisagem em Ambiente Periglacial na Península Barton, Antártica Marítima. **Revista do Departamento de Geografia USP**, v. 0, n. spe, p. 259-267, 2017. <http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/132721>
- LOPES, D.V.; SIQUEIRA, R.G.; OLIVEIRA, F.S.; FERNANDES FILHO, E.I.; SCHAEFER, C.E.G.R.; CORRÊA, G.R., Solos de basalto da Antártica: implicações paleoclimáticas ao longo de uma sequência climática. **REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 13, n. 1, p. 7–18, 2019a.
- LOPES, D.V; SCHAEFER, C.E.G.R.; SOUZA, J.J.L.L.; OLIVEIRA, F.S.; SIMAS, F.N.B.; DAHER, M.; GJORUP, D.F. Concretionary horizons, unusual pedogenetic processes and features of sulfate affected soils from Antarctica. *Geoderma* 347, 13–24, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.024>
- LOPES, D. V.; OLIVEIRA, F. S.; SOUZA, J.J.L.L.; MACHADO, M.R.; SCHAEFER, C. E. G. R., Soil pockets phosphatization and chemical weathering of sites affected by flying birds of Maritime Antarctica. **An Acad Bras Cienc** 94: e20210595, 2022a. <https://doi.org/10.1590/0001-376520220210595>
- LOPES, D. V.; OLIVEIRA, F. S.; PEREIRA, T.T.C.; SCHAEFER, C. E. G. R., Pedogeomorphology and weathering at Snow Island, Maritime Antarctica. *Catena* 217 (2022) 106515, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106515>
- LOPEZ-MARTINEZ, J.; SERRANO, E.; SCHMID, T.; MINK, S.; LINÉS, C. Periglacial processes and

landforms in the South Shetland Islands (northern Antarctic Peninsula region). **Geomorphology**, v. 155–156, p. 62–79, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.018>

MARKEWICH, H.W.; PAVICH, M.J.; MAUSBACH, M.J.; JOHNSON, R.G.; GONZALEZ, V.M. A Guide for Using Soil and Weathering Profile Data in Chronosequence Studies of the Coastal Plain of the Eastern United States. **U.S. Geol. Surv. Bull. 1589-D**. U.S. Government Printing Office: Washington, DC, USA, p.31-39, 1989.

MICHEL, R.F.M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; DIAS, L.E.; SIMAS, F.N.B.; BENITES, V.M.; MENDONCA, E.S. Ornithogenic Gelisols (Cryosols) from maritime Antarctica; pedogenesis, vegetation, and carbon studies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70(4), n. October, p. 1370–1376, 2006.

NAVARRO, F.J.G.; ORTIZ-VILLAJOS, J.A.A.; JIMENEZ, C.J.S.; BALLESTA, R.J. Red soil geochemistry in a semiarid Mediterranean environment and its suitability for vineyards. **Environ Geochem Health** (2011) 33:279–289, 2011. DOI 10.1007/s10653-010-9340-8

OTERO, X. L.; DE LA PEÑA-LASTRA, S.; PÉREZ-ALBERTI, A.; FERREIRA, T.O.; HUERTA-DIAZ, M.A. Seabird colonies as important global drivers in the nitrogen and phosphorus cycles. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2018. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-02446-8>

PEREIRA, T.T.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; KER, J.C.; ALMEIDA, C.C.; ALMEIDA, I.C.C.; PEREIRA, A.B. Genesis, mineralogy and ecological significance of ornithogenic soils from a semidesert polar landscape at Hope Bay, Antarctic Peninsula. **Geoderma**, 209–210, p. 98–109, 2013.

QIN, X.; SUN, L.; BLAIS, J.M.; WANG, Y.; HUANG, T.; HUANG, W.; XIE, Z. From sea to land: assessment of the bio-transport of phosphorus by penguins in Antarctica. **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, v. 32, n. 1, p. 148–154, 2014.

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** 336, p. 77–94, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.030>

SCHAEFER, C.E.G.R.; PEREIRA, T.T.C.; ALMEIDA, I.C.C.; MICHEL, R.F.M.; CORRÊA, G.R.; FIGUEIREDO, L.P.S.; KER, J.C. Penguin activity modify the thermal regime of active layer in Antarctica: A case study from Hope Bay. **Catena**, v. 149, p. 582–591, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.021>

SCHAEFER, C.E.G.R.; PEREIRA, T.T.C.; KER, J.C.; ALMEIDA, I.C.C.; SIMAS, F.N.B.; OLIVEIRA, F.S.; CORREA, G.R.; VIEIRA, G. Soils and Landforms at Hope Bay, Antarctic Peninsula: Formation, Classification, Distribution, and Relationships. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 1, p. 175–184, 2015.

SIMAS, F.N.B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MELO, V.F.; GUERRA, M.B.B.; SAUNDERS, M.; GILKES, R.J. Clay-sized minerals in permafrost-affected soils (Cryosols) from King George Island, Antarctica. **Clays and Clay Minerals**, v. 54, n. 6, p. 721–736, 2006.

SIMAS, F.N.B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MELO, V.F.; ALBUQUERQUE-FILHO, M.R.; MICHEL, R.F.M.; PEREIRA, V.V.; GOMES, M.R.M.; COSTA, L.M. Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica: Phosphatization as a soil forming process. **Geoderma**, v. 138, n. 3–4, p. 191–203, 2007.

SIMAS, F.N.B.; SCHAEFER, C.E.G.; FILHO, M.R.A.; FRANCELINO, M.R.; FILHO, E.I.F.; 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.E.G.; MICHEL, R.F.M.; FRANCELINO, M.R.; BOCKHEIM, J.G. Soils of the South Orkney and South Shetland Islands, Antarctica. In: BOCKHEIM, J.G. (Org.). **The soils of Antarctica**. 1. ed. Switzerland: Springer International Publishing, p. 227–273, 2015.

SIQUEIRA R.G.; LOPES D.V.; SOUZA J.J.L.L.; SCHAEFER C.E.G.R.; SOUZA C.D.; OLIVEIRA F.S.D.; FERNANDES FILHO E.I. Acid sulfate soils from Antarctica: genesis and properties along a climatic gradient. **An Acad Bras Cienc** 94: e20210625, 2021a. DOI 10.1590/0001-3765202120210625.

SIQUEIRA R.G.; SCHAEFER C.E.G.R.; FERNANDES-FILHO E.I.; CORRÊA G.R.; FRANCELINO M.R.; SOUZA J.J.L.L.; ROCHA P.A. Weathering and pedogenesis of sediments and basaltic rocks on Vega Island, Antarctic Peninsula. **Geoderma** 382: 114707, 2021b.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service. 410p, 2022.

SOUZA, J.J.L.L.; SCHAEFER, C.E.G.R.; ABRAHÃO, W.A.P.; DE MELLO, J.W. V.; SIMAS, F.N.B.; DA SILVA, J.; FRANCELINO, M.R. Hydrogeochemistry of sulfate-affected landscapes in Keller Peninsula, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, v. 155–156, p. 55–61, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.017>

SOUZA, C.D.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SIMAS, F.N.B.; SPINOLA, D.N.; DAHER, M. Soil formation in Seymour Island, Weddell Sea, Antarctica. **Geomorphology**, p. 1–13, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.047>.

SOUZA, C.D.; SCHAEFER, C.E.G.R.; ROQUE, M.B.; FARIA, A.L.L.; ROSA, K.K.; THOMAZINI, A.; DAHER, M. Soil and landform interplay in the dry valley of Edson Hills, Ellsworth Mountains, continental Antarctica. **Geomorphology (Amst)**. 295, p. 134–146, 2017.

TATUR, A. Ornithogenic soils of the maritime Antarctic The maritime Antarctic forms a climatic zone , which surrounds the. **Polish Polar Research**, v. 10, n. 4, p. 481–532, 1989.

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.

ZAZOVSKAYA, E.P.; FEDOROV-DAVYDOV, D.G.; ALEKSEEVA, T.V.; DERGACHEVA, M.I. Soils of Queen Maud Land. In: BOCKHEIM, J.G. (Org.). . **The soils of Antarctica**. 1. ed. Switzerland: Springer International Publishing, p. 21–44, 2015.



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).